



Saga University

佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 成果報告集〔第3巻〕



佐賀大学
有明海
総合研究
プロジェクト

2007(平成19)年5月

ごあいさつ

有明海総合研究プロジェクト
プロジェクト長 荒牧 軍治

学長裁量経費による支援を受けて有明海総合研究プロジェクトを立ち上げたのが平成16年4月、翌年17年度から文部科学省の特別教育研究経費の支援を受けて新たに5年計画で再スタートした研究プロジェクトも2年が経過しました。5年間の期限付きですので、我々の研究プロジェクトも道半ばに到達したことになります。

有明海総合研究プロジェクトは、副プロジェクト長2名を含む14名のコア研究者、14名と2チームの学内研究協力者、6名の客員研究員で構成されています。また、3名の非常勤研究員（ポスドク）は、コア研究の重要な部分について独立した研究者として調査研究に当たっています。何といても、コア研究の中核として有明海研究に専念する新進気鋭の5名の専任教員をおいていることが本研究プロジェクトの最大の特徴と言えます。

平成17年度は新たな研究体制作り、研究室の整備、機器類の購入と予備的調査・実験に多くの時間が割かれたため、研究成果については甘く評価して戴いた面があったのは間違いありません。2年目の今年はそのような言い訳は通用しないことは十分に認識しています。平成18年の有明海は、大規模な貧酸素水塊が長期間持続し、近年にない異常な状況が続きました。研究者達は、事あるたびに有明海に出かけてはデータを集積し、研究室で分析を繰り返しました。夏の暑い最中も、海苔網が張り巡らされている冬場にも有明海に出て得られた調査研究成果は、各種ジャーナル、学会で数多く発表されています。それらの成果を取りまとめて、ここに平成18年度中に佐賀大学有明海総合研究プロジェクト研究成果報告集を刊行いたします。厳格に評価いただき、ご批判、ご助言いただければ幸いです。

本年度、個別研究課題に関しては十分な成果を挙げる事ができたとの確信はありますが、一方で取り組みが迫られている研究成果の総合化の作業が十分に行えなかったことを反省しています。環境省に設置された有明海・八代海総合調査評価委員会はこれまでに蓄積された有明海に関する調査研究を収集分析し、有明海環境問題に最終報告書を提出しました。平成19年度中には「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」（有明海特措法）が継続され、今後の有明海調査研究のマスタープラン及びルートマップ作りを中心とした新たな取り組みが開始されます。その中に有明海総合研究プロジェクトの成果を反映させるためにも、プロジェクト研究自体を発展的に継続するためにも、研究成果の総合化の作業に取り組まなければなりません。平成19年度は、その作業にも積極的に取り組み、環境省が作成するマスタープランに反映させたいと考えています。

なお、本成果報告集は、後日、ホームページ上にカラー版で掲載する予定にしています。白黒図面で理解しがたい点がありましたら、ホームページ上のカラー版をご参照下さい。

佐賀大学有明海総合研究プロジェクトホームページ

<http://www.ariake.civil.saga-u.ac.jp/>

目 次

■ はじめに

■ 環境物質動態研究部門

- 有明海奥部における底泥の再懸濁・沈降に関する研究 1
山本浩一・槻木(加)玲美・速水祐一・安江洋介・吉野健児・濱田孝治・大串浩一郎・
山田文彦
- 佐賀地域クリーク末端における底泥直上水浄化と栄養塩溶出抑制に関する基礎的研究 9
原田浩幸・志波政文・小山恵介・樋口真由子・山本浩一・井上勝利・蔵本厚一
- 有明海底質細胞外ポリマーの分析とその評価に関する研究 15
原田浩幸・大石明広・山本浩一・井上勝利・川喜田英孝
- 有明海奥部浅海域のベントス相の長期的変動 21
吉野健児・山本浩一・速水祐一・濱田孝治・上野大介・大串浩一郎
- 有明海奥部泥質干潟の地形・底質変動特性に関する研究 29
笠置尚史・中岡勝巳・古賀勝喜・吉野健児・大串浩一郎・荒牧軍治・山本浩一
- 筑後川感潮河道における洪水時の底質浸食及び濁質輸送に関する研究 35
横山勝英・山本浩一・金子 祐

■ 干潟底質環境研究部門

- 佐賀県沿岸域における覆砂効果について 39
加藤 治・原口智和・瀬口昌洋・郡山益実
- 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生機構について 47
瀬口昌洋・郡山益実・石谷哲寛・加藤 治・原口智和
- 2006年夏季における有明海湾奥部海水中の貧酸素水塊と鉄の濃度化 55
田端正明・大久保壮志・速水祐一・濱田孝治
- 有明海奥部干潟域における脱窒菌群の生息分布と底質環境について 61
郡山益実・瀬口昌洋・古賀あかね・野田美幸
- 廃材炭化物および植物の利用によるクリークの水質負荷削減 67
原口智和・加藤 治・瀬口昌洋・郡山益実

■ 環境モデル研究部門

有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について — 2年目の成果 —	71
速水祐一・槻木(加)玲美・濱田孝治・山本浩一・吉野健児・大串浩一郎・平川隆一・ 宮坂仁・大森浩二	
有明海奥部の貧酸素水塊 — 形成機構と長期変動 —	81
速水祐一	
有明海奥部における流れと懸濁物輸送 — 現地観測と数値モデルによる考察 —	87
濱田孝治・速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一・山田裕樹	
有明海湾奥部の残差流分布観測並びに土地利用GISを用いた筑後川流域の流出解析	93
大串浩一郎・速水祐一・濱田孝治・山本浩一・平川隆一・鶴田芳昭	
有明海ノリ養殖場における一潮汐間の珪藻・渦鞭毛藻類の時空間変動	101
槻木(加)玲美・山本浩一・速水祐一・谷幸則・吉野健児・濱田孝治	
筑後川感潮域における水理特性と物質輸送	111
平川隆一・速水祐一・山本浩一・横山勝英・大串浩一郎・濱田孝治	

■ 微生物相研究部門

有明海に生息する細菌の生産するII型制限酵素	115
加藤富民雄・村田昌子・神田康三・小林元太	
有明海由来のキシロース資化性新奇乳酸菌に関する研究	121
小林元太・岡宏圭・田代幸寛・加藤富民雄・林信行	
有明海干潟泥中の細菌相解析とビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリオファージの分離	127
田代幸寛・光武奈緒子・小林元太・加藤富民雄	
有明海におけるスミノリ症病原細菌の経年変換	135
神田康三	
ポルフィランの栄養生理機能に関する研究	139
柳田晃良・山野尚美・坂田幸太郎・井上奈穂・永尾晃治	
高度活性化物質探索を目的としたプライミング好中球の調製	143
杉山大輔・林 良・柴田大介・長田聰史・藤田一郎・浜崎雄平・兒玉浩明	

■ 食水系感染症研究部門

ビブリオ・バルニフィカス感染症対策 — 臨床医学的アプローチ (第二報) —	147
中島幹夫・大石浩隆・浦由紀子・前田祥範・三溝慎次・荒木和邦	
ビブリオ・バルニフィカス感染症対策 — 基礎医学的アプローチ (第二報) —	153
大石浩隆・中島幹夫・中島由佳理・高柳恵・草場耕二・永沢善三	

当院で経験した敗血症性ショックの2症例	159
三溝慎次・濱田 献・鈴木有希・荒木和邦・大石浩隆・中島幹夫	
環境及びヒト由来ビブリオ・バルニフィカスの遺伝子学的相同性の検討	163
高柳恵・中島由佳理・草場耕二・永沢善三・大石浩隆・中島幹夫	

■ 地域文化・経済研究部門

有明海・諫早湾に関する総合的データベースの構築と新しい社会的決定システムに関する研究(2)	167
榎澤秀木・池田智子	
佐賀県有明海沿岸域におけるのり養殖集落の性格 —川副町南川副集落を事例に—	171
山下宗利	
日韓両国の干潟生態系における食用水族資源の再生産力と採捕量等に関する計時的・計量的比較研究3：韓国における干拓の歴史と群山周辺の漁撈	179
武田 淳	
有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける文化的景観の保全(2) —有明海北西部における海苔養殖漁家の複合的生業—	185
五十嵐 勉	
有明海、及びアジア諸地域における干潟のワイズ・ユースに関する比較研究、及び干潟の生業・生活文化のデジタルアーカイブの構築—第2報—	191
五十嵐 勉・武田 淳・辻 一成・藤村 美穂	
有明海沿岸地域における干拓集落の景観	195
藤永 豪	

CONTENTS

■ Preface

■ Research Division of SEDIMENT and MATERIAL TRANSPORT

RESUSPENSION AND DEPOSITION OF MUD IN THE INNERMOST PART OF THE ARIAKE SEA ... 1 Koichi YAMAMOTO, Narumi TSUGEKI-KUWAE, Yuichi HAYAMI, Yosuke YASUE, Kenji YOSHINO, Takaharu HAMADA, Koichiro OHGUSHI and Fumihiko YAMADA	
WATER PURIFICATION AND TO DEPRESS NUTRIENTS LEACHING AT END OF CREEK IN SAGA CITY SITE. 9 Hiroyuki HARADA	
STUDY ON THE ANALYSIS AND THE EVALUATION OF EXTRACELLULAR POLYMERIC SUBSTANCES (EPS) IN ARIAKE SEA 15 Hiryokuki HARADA, Akihiro OHISHI , Kouich. YAMAMOTO, Katutoshi INOUE and Hidetaka KAWAKITA	
A LONG-TERM CHANGE IN THE MACROBENTHIC FAUNA OF THE INNER PART OF ARIAKE SEA 21 Kenji YOSHINO, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA, Daisuke Ueno, Koichiro Ohgushi	
A STUDY OF BED TOPOGRAPHY AND SEDIMENT OF INNER PART OF ARIAKE SEA 29 Katsuki KOGA	
EROSION AND TRANSPORT PROCESS OF COHESIVE SEDIMENT IN THE CHIKUGOGAWA ESTUARINE CHANNEL 35 Katsuhide YOKOYAMA, Kouichi YAMAMOTO and Yu KANEKO	

■ Research Division of ENVIRONMENTAL SCIENCE and TECHNOLOGY of TIDAL FLAT and SEDIMENT

EFFECT OF THE SAND BANKING SEDIMENT IN THE ARIAKE SEA OF SAGA OFFING 39 Osamu KATO, Tomokazu HARAGUCHI, Masahiro SEGUCHI and Masumi KOORIYAMA	
OCCURRENCE MECHANISM OF HYPOXIC WATER IN THE WESTERN INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA 47 Masahiro SEGUCHI, Masumi KORIYAMA, Tetuhiro ISHITANI, Osamu KATO and Tomokazu HARAGUCHI	
CHANGE IN IRON CONCENTRATION AT DIFFERENT DEPTH IN THE ARIAKE SEA IN SUMMER, 2006 WITH SPECIAL REFERENCE TO HYPOXIC AREA 55 Masaaki TABATA, Takeshi OHKUBO, Yuichi, HAYAMIA, HAMADA	
DISTRIBUTION OF DENITRIFIERS AND BOTTOM SEDIMENT ENVIRONMENT IN TIDAL FLAT OF THE INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA 61 Masumi KORIYAMA , Masahiro SEGUCHI Akane KOGA and Miyuki NODA	

REDUCTION OF WATER QUALITY LOADS IN CREEK USING CARBONIZED WASTES AND PLANTS	67
Tomokazu HARAGUCHI, Osamu KATO, Masahiro SEGUCHI, Masumi KOORIYAMA	

■ Research Division of ENVIRONMENTAL MODELING

MASS TRANSPORT AND ECOSYSTEM DYNAMICS IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA -RESULTS OF THE 2 nd YEAR-	71
Yuichi HAYAMI, Narumi TSUGEKI-KUWAE, Takaharu HAMADA, Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Koichiro OHGUSHI, Ryuichi HIRAKAWA, Hitoshi MIYASAKA and Koji OMORI	
HYPOXIC WATER MASS IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA: ITS FORMATION AND INTER-ANNUAL VARIATION	81
Yuichi HAYAMI	
CURRENT AND SUSPENDED SOLID TRANSPORT - DISCUSSION BY THE OBSERVATION AND NUMERICAL MODEL -	87
Takaharu HAMADA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Koichiro OHGUSHI, Kenji YOSHINO, Ryuichi HIRAKAWA and Yuki YAMADA	
OBSERVATIONS OF RESIDUAL CURRENT DISTRIBUTION IN THE INNERMOST PART OF THE ARIAKE SEA AND RUNOFF ANALYSES OF THE CHIKUGO RIVER BASIN USING LAND USE GIS	93
Koichiro OHGUSHI, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA, Koichi YAMAMOTO, Ryuichi HIRAKAWA and Yoshiaki TSURUTA	
CONTRASTING DISTRIBUTION OF DINOFLAGELLATE VERSUS DIATOM DURING A TIDAL CYCLE IN A SHALLOW ESTUARY, ARIAKE SEA	101
Narumi TSUGEKI-KUWAE, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Yukinori TANI, Kenji YOSHINO and Takaharu HAMADA	
HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE ESTUARY OF CHIKUGO RIVER	111
Ryuichi HIRAKAWA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Katsuhide YOKOYAMA, Koichiro OHGUSHI, Takaharu HAMADA	

■ Research Division of MICROBIAL TECHNOLOGY

STUDY ON TYPE II RESTRICTION ENDONUCLEASE OF BACTERIA ISOLATED FROM THE ARIAKE SEA	115
Fumio KATO, Akiko MURATA, Kohzo KANDA and Genta KOBAYASHI	
A STUDY OF NOVEL LACTIC ACID PRODUCER UTILIZING XYLOSE IN ARIAKE SEA	121
Genta KOBAYASHI, Hiroyoshi OKA, Yukihiro TASHIRO, Fumio KATO and Nobuyuki HAYASHI	
ANALYSIS OF BACTERIAL FLORA IN ARIAKE SEA TIDELAND AND ISOLATION OF BACTERIOPHAGE INFECTIOUS TO <i>Vibrio vulnificus</i>	127
Yukihiro TASHIRO, Naoko MITSUTAKE, Genta KOBAYASHI and Fumio KATO	
SECULAR CHANGE OF <i>SUMINORI</i> PATHOGENIC BACTERIA IN ARIAKE SEA	135
Kohzo KANDA	
PHYSIOLOGICAL FUNCTION OF PORPHYRAN ON LIPID METABOLISM IN HEPG2 CELLS	139
Teruyoshi YANAGITA, Naomi YAMANO, Kotaro SAKATA, Nao INOUE and Koji NAGAO	

PREPARATION OF PRIMING NEUTROPHILS BY TRANSMEMBRANE PEPTIDES DERIVED FROM FMLP RECEPTOR	143
Daisuke SUGIYAMA, Ryo HAYASHI, Daisuke SHIBATA, Satoshi OSADA, Ichiro FUJITA, Yuhei HAMASAKI, and Hiroaki KODAMA	

■ Research Division of MARINE & FOOD –BORNE INFECTION

A <i>VIBRIO VULNIFICUS</i> MEASURES APPROACH OF CLINICAL MEDICINE -THE SECOND REPORT-	147
Mikio NAKASHIMA, Hirotaka OISHI, Yukiko URA Yoshinori MAEDA, Shinji MITSUMIZO and Kazukuni ARAKI	
A <i>VIBRIO VULNIFICUS</i> MEASURES APPROACH OF BASIC MEDICINE -THE SECOND REPORT-	153
Hirotaka OISHI, Mikio NAKASHIMA, Yukari NAKASHIMA Megumi TAKAYANAGI, Kouji KUSABA and Zenzo NAGASAWA	
TWO CASES WITH SEPTIC SHOCK IN SAGA MEDICAL SCHOOL HOSPITAL	159
Shinji MITSUMIZO, Sasagu HAMADA, Yuki SUZUKI, Kazukuni ARAKI, Hirotaka OISHI and Mikio NAKASHIMA	
GENETIC HOMOGENY STUDIES ON ENVIRONMENT-DERIVED AND CLINICAL ISOLATE OF <i>VIBRIO VULNIFICUS</i>	163
Megumi TAKAYANAGI, Yukari NAKASHIMA, Kouji KUSABA, Zenzo NAGASAWA, Hirotaka OISHI and Mikio NAKASHIMA	

■ Research Division of REGIONAL CULTURE and ECONOMY

CONSTRUCTION OF DATA-BASE FOR ARIAKE SEA AND ISAHAYA BAY, AND RESEARCH ON NEW SOCIAL DECISION-MAKING SYSTEM(2)	167
Hideki KASHIZAWA, Satoko IKEDA	
FIELD SURVEYS ON CHARACTERISTICS OF SEAWEED GROWERS SETTLEMENTS IN KAWASOE, SAGA JAPAN	171
Munetoshi YAMASHITA	
MARINE RESOURCES ON TIFAL FLATS 3: HISTORY OF RECLAMATION AND FISHING ACTIVITIES AT KUNSAN, KOREA	179
Jun TAKEDA	
CONSERVATION OF MULTIPLE CULTURAL -LANDSCAPE IN THE INSHORE ECOTONE, ARIAKE AND YATSUSHIRO SEA(2): MULTIPLE SUBSISTENCE OF SEAWEED GROWER -FISHERMAN IN THE NORTH-EAST ARIAKE SEA	185
Tsutomu IGARASHI	
COMPARATIVE STUDY ON THE WISE USE OF TIDAL FLAT IN THE AREAKE SEA AND ASIAN COASTAL REGIONS, AND THE CONSTRUCTIONS OF SUBSISTENCE AND HUMAN LIFE-DIGITAL ARCHIVES	191
Tsutomu IGARASHI, Jun TAKEDA, Kazunari TSUJI, and Miho FUJIMURA, Tsukasa INAOKA, Jun TAKEDA, Kazunari TSUJI and Miho FUJIMURA	
RURAL LANDSCAPES OF RECLAIMED LANDS ON THE ARIAKE SEA, SAGA, JAPAN	195
Go FUJINAGA	

環境物質動態研究部門

Research Division of SEDIMENT and MATERIAL TRANSPORT

有明海奥部における底泥の 再懸濁・沈降に関する研究

RESUSPENSION AND DEPOSITION OF MUD
IN THE INNERMOST PART OF THE ARIAKE SEA

山本浩一¹・槻木(加)玲美²・速水祐一³・
安江洋介⁴・吉野健児⁵・濱田孝治¹・大串浩一郎⁶・山田文彦⁷

Koichi YAMAMOTO, Narumi TSUGEKI-KUWAE, Yuichi HAYAMI, Yosuke YASUE,
Kenji YOSHINO, Takaharu HAMADA, Koichiro OHGUSHI and Fumihiko YAMADA

- ¹博(工) 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 講師(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
²博(理) 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 研究機関研究員(同上)
³農博 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 准教授(同上)
⁴ 佐賀大学理工学部都市工学科(同上)
⁵博(水) 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 研究機関研究員(同上)
⁶工博 佐賀大学理工学部都市工学科(同上)
⁷博(工) 熊本大学大学院自然科学研究科 助教授(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

To clarify the sediment transport in the Ariake Sea, we studied the *in situ* mass settling flux and deposition rate in the two different points in the Ariake Sea. The erosion of the sediment was modeled with normal erosion formula. Critical shear stress of the erosion in the Daiju Tidal Flat was higher than that of the Hamakawa Tower, The offshore of the Kashima town. The mass settling flux varied mainly with the concentration of SS. We also found that the density of the floc was changed in one tide because the density of water varies in one tide. .

Key Words : *sediment, floc, density, tidal flat, seabed*

1. はじめに

近年, 有明海湾奥部において透明度の上昇¹⁾や底質の細粒化²⁾など, 懸濁物質(SS)に関連する問題の解決が急務となっており, 懸濁物質の動態を明らかにする必要がある。これに対しては資料解析による長期データの解析³⁾と同時に, 数値モデルによる再現計算による解析が必要であり, このため懸濁物質の挙動のモデル化に必要な情報を蓄積する必要がある。

懸濁物質の動態をモデル化するためには懸濁物質の再懸濁速度と沈降速度の2つの量をモデル化することが基本となる。

既往の研究によれば, 懸濁物質の沈降について, 山西らは有明海西部の泥質干潟において自動昇降型多項目水質計を用いて懸濁物質の鉛直積分値の変化を解析し, SS濃度が189 mg l⁻¹の条件で沈降速度2.8×10⁻⁴ m s⁻¹, 見かけの鉛直SSフラックスとして5.29×10⁻⁵ kg m⁻² s⁻¹(= 1.33 kg m⁻² day⁻¹)を得ている⁴⁾。さらにセジメントトラップを用いた現地試験によって底面において濃度範囲 70 - 600 mg L⁻¹の条件で2.54 kg m⁻² day⁻¹を得ている⁵⁾。再懸濁フラックスについては中川ら⁶⁾が熊本港沖で限界剪断応力として0.0235Paを得ている。しかしながら既往の有明海の

懸濁物質動態に関する研究は沈降速度, 沈降フラックス, 再懸濁速度を直接測定したものではないため, その時系列変動についてはほとんど解明されていない。

河口域を含めた有明海でみられる懸濁物質濃度の範囲は広く, 干潟部や河口部では2000 mg L⁻¹以上の懸濁物質濃度が観測される⁷⁾が, 2006年6月から10月にかけて行われた本プロジェクトにおける有明海奥部の観測で採取された満潮時の海域の懸濁物質濃度については平均10.85 mg L⁻¹(n = 481)であり, 満潮憩流時にはほぼ全層で懸濁物質濃度が低く, 比較的清澈である(図 1)。

懸濁物質組成も一様ではなく, 有機物が主体の懸濁物質から粘土が主体の懸濁物質まで幅広い(図 2)。このように広範囲の濃度や組成の懸濁物質の挙動をモデル化する必要がある。さらに, 沈降・堆積過程においては懸濁物質が底面で10 g L⁻¹を超えるため, 底面でのゲル化(さらには圧密・固化)プロセスをも考慮に入れてモデル化しなくてはならない⁸⁾。有明海の懸濁物質は藻類を多量に含みかつ凝集している⁹⁾ために沈降速度が時空間的に変動すると考えられるものの, このような複雑な条件を含有する現場での実態が明らかになっているとは言い難い。そこで

懸濁物質の再懸濁特性や特に時系列での沈降特性を明らかにすることを目的とした。

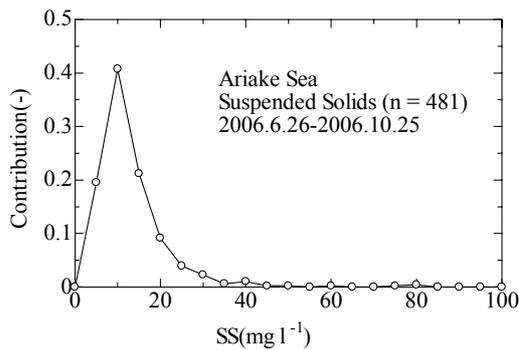


図 1 有明海湾奥部の懸濁物質濃度の度数分布(2006年, 夏季満潮時に測定, n = 481)。

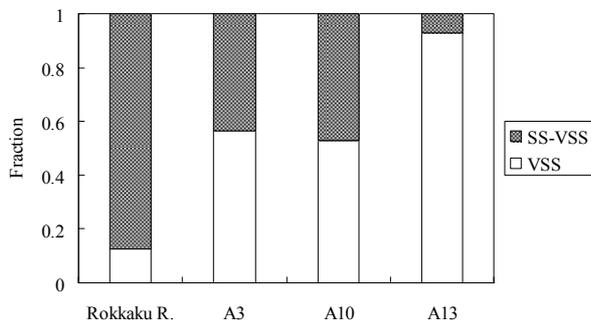


図 2 六角川および有明海の表層懸濁物質(SS)の強熱減量(VSS); 2006年8月25日, 六角川: 六角川住之江港表層水, A3, A10, A13: 図3を参照。

2. 研究方法

(1) 現地観測方法

現地観測は2005年12月と2006年9月の2回行った。この概要を表1に示す。

2005年12月2日の8:00から18:00までの10時間, 有明海東と賀町沖の大授干潟(図 3)にてSta.4にADCPを機装した観測船一隻を係留し, 多項目水質計やレーザー粒度分析計(LISSST-100)による鉛直水質観測および採水を行い, もう一隻の観測船によって岸沖方向(Sta.1~Sta.8)の水質の往復観測を行った。採水したサンプルについては各態溶存栄養塩を分析した。

2006年9月5日, 6時から17時30分に有明海湾奥部の佐賀県浜川タワー(図 3中Sta.H; 北緯33°5'4", 東経130°10'27")において, 超音波流速計(Nortek Vector), レーザー粒度分析計(Sequoia LISSST-100), 水質計(YSI 600QS)を設置し, 計測した。それぞれの設置位置は底面上20cm, 50cm, 20cmである。超音波流速計はサンプリング周波数64Hzで20秒間の測定を5分間隔で自記記録し, レーザー粒度分析計は粒径1.36~230 μ mの粒径について32分画の粒径の体積濃度を5分間隔で自記記録した。水質計は水温・塩分・pH・DO・ORPを1分間隔で自記記録した。同時に15分から30分間隔でクロロフィル濁度計(Alec compact CTD)を用いて水温・塩分・クロ

ロフィル蛍光・濁度の鉛直分布を測定した。

表 1 観測一覧

地点	期間	項目
大授干潟 (Sta. 1 ~ Sta.8)	2005.12.2	鉛直流速分布 鉛直水質分布 栄養塩濃度変動
佐賀県浜川タワー	2006.9.5	底面乱流速 鉛直水質分布 フロック沈降速度 懸濁物質粒度分布

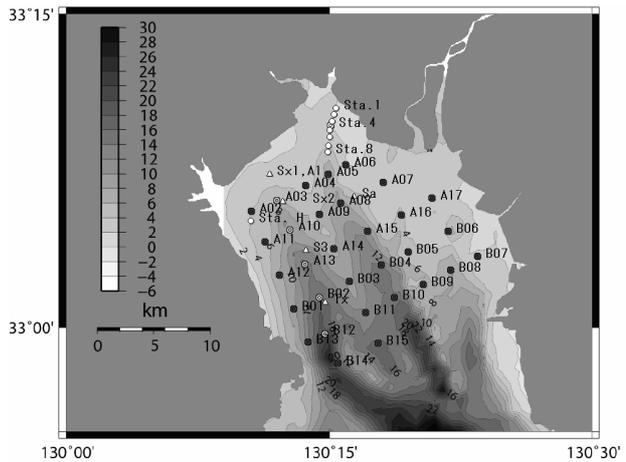


図 3 調査対象水域

(2) 水質鉛直分布からの沈降速度推定方法

水柱あたりのSS現存量 M (kg m^{-2})の時間変化 $\Delta M / \Delta t$ ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)と再懸濁速度 E ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 沈降フラックス D ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)は鉛直次元を仮定すると,

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = E - D \quad (1)$$

となる。 D ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)はSSの沈降速度を w_s (m s^{-1}), 水柱の高さ H (m)の増加速度 $\Delta H / \Delta t$ (m s^{-1})によってSS濃度を C (kg m^{-3})としたとき

$$D = (w_s - \Delta H / \Delta t)C \quad (2)$$

と与えられる。

(3) 底面剪断応力推定方法

2005年12月2日の観測についてはADCPで得られた鉛直流速分布から対数則に近似して底面剪断応力を計算した。海底面は大授干潟の中央粒径 $d_{50} < 0.020$ m, $u^* < 0.1 \text{ m s}^{-1}$, $\nu = 1.4 \times 10^{-5}$ より,

$$\frac{u^* k_s}{\nu} = 0.14 \leq 5 \quad (3)$$

となり, 滑面とみなしてよい¹⁰⁾。

ただし u^* : 摩擦速度 (m s^{-1}) , k_s : 相当粗度高 (m) .

水平流速は対数分布則の範囲で

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \log_e \left(\frac{u^* z}{\nu} \right) + 5.5 u^* \quad (4)$$

となる¹¹⁾ . ただし u : 水平流速 (m s^{-1}) , z : 底面からの高さ (m) , ν : 動粘性係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) , κ : カルマン定数

u^* を求める際には(4)式と実際の鉛直流速分布から, 繰り返し計算を行い最小2乗法によって u^* を求めた. 底面剪断応力は下記で表される¹²⁾ .

$$\tau^* = \rho u^{*2} \quad (5)$$

ここで τ^* : 底面剪断応力 (Pa) , ρ : 水の密度 (kg m^{-3})

(4)沈降フラックスの計測方法

2006年9月5日の浜川タワーでの観測についてはバンドン採水器で底面上50 cmの海水を採取し,十分に現場海水の温度に近づけた透明アクリル角筒(厚さ1cm幅3cm高さ25cm)に静かに分取して横からフロクの沈降状況をマクロレンズ付きハイビジョンビデオカメラで撮影することでフロクの粒径と沈降速度の関係を得た. 目視で対流がほとんど起こらない状態を確認して撮影を行った. ハイビジョンカメラで撮影したフロクの画像を図4に示す.

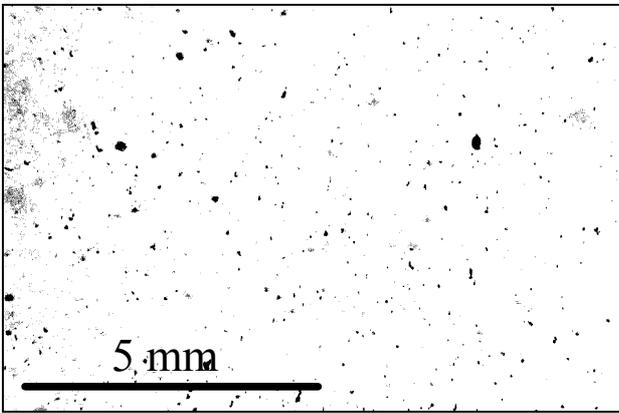


図4 沈降試験時の映像からのキャプチャ画像, 浜川タワー, 2006年9月5日, 11:30

フロクの沈降速度の解析には画像の流跡線を用いた. ハイビジョンカメラで得た動画はAdobe Premiereを用いて30 fps の連続静止画に加工し,画像解析ソフト(NIH Image-J)を用いて, 30枚(1秒間)の連続静止画像を合成してフロクの流跡線を作成した. 流跡線の短径をフロクの粒径 d , 長径をフロクの粒径と移動距離の和 ($d + w \Delta t$)としてフロクの粒径と沈降速度 w の関係を求めた. 画像解析の際は著しく球形から離れた粒子については解析から除外した.

粒子レイノルズ数が1より小さい時,粒子の沈降速度はストークスの式で表される. フロクを破壊して測定した中央粒径の粒子は少なくとも単粒子であると仮定し, 中央粒径での $\rho_s = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ とし,(6)式で有効密度を算出し,回帰曲線からフロク密度関数 $\rho_e(a)$ を求めた.

$$\rho_e(a) = \frac{18\mu(T)}{ga^2} w_s(a, T) \quad (6)$$

ここで a : 粒径 (m) , $\rho_e(a)$: 粒径 a におけるフロクの有効密度 (kg m^{-3}) , T : 水温 $\mu(T)$: 水温 T における粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) , g : 重力加速度 (m s^{-2}) , $w_s(a, T)$: 粒子の沈降速度 (m s^{-1}) .

次にLisst-100による体積濃度の粒径分布から重量濃度分布 $C_M(a)$ (kg m^{-3})を(7)式より求めた.

$$C_M(a) = \frac{\rho_e(a)\rho_s}{\rho_s - \rho_w} C_V(a) \quad (7)$$

ここで ρ_w : 水の密度 (kg m^{-3}) , ρ_s : 粒子単体の密度 (kg m^{-3}) , $C_V(a)$: 粒径 a の懸濁物質の体積濃度 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

ストークス式で与えられる沈降速度と重量濃度 C_M を用いて,(8)式で沈降フラックス D を求めた.

$$D = \frac{\mu(T_o)}{\mu(T_f)} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} C_M(a) \cdot w_s(a, T) da \quad (8)$$

ここで a_{\min} : フロク最小粒径, a_{\max} : フロク最大粒径. 沈降フラックス D ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) , T_o : 沈降実験時水温, T_f : 現場水温.

沈降フラックス D をSS濃度で除することで重量平均沈降速度 $w_{s, \text{mean}}$ (m s^{-1})を得た.

$$w_{s, \text{mean}} = \frac{D}{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} C_M(a) da} \quad (9)$$

ここで, $w_{s, \text{mean}}$: 重量平均沈降速度 (m s^{-1})

(5)乱流による再懸濁フラックスの計測方法

流速は5分間隔にて64Hz, 20秒間取得し,(10)式でレイノルズ応力,(11)式で音響強度をSS濃度に換算し,(12)式で超音波流速計のデータから渦相関法により5分おきの鉛直SSフラックスを算出した.

$$\tau_{xz} = \rho_w \sqrt{\langle -v_n' w' \rangle^2 + \langle -v_e' w' \rangle^2} \quad (10)$$

$$EL = a \log_{10} C + b \quad (11)$$

$$J_z = \langle C' w' \rangle \quad (12)$$

ただし τ_{bz} : 底面剪断応力, v_n' : 北方流速乱流成分 ($m s^{-1}$), v_e' : 東方流速乱流成分 ($m s^{-1}$), w' : 鉛直上方流速乱流成分 ($m s^{-1}$), EL : 反射音響強度 (dB), C : SS濃度 ($kg m^{-3}$), C' : SS濃度変動成分 ($kg m^{-3}$), J_z : 乱流鉛直SSフラックス ($kg m^{-2} s^{-1}$), a, b : 定数, $\langle \rangle$ は平均操作を示す.

採水したサンプルは, 超音波洗浄器で破碎し, レーザー粒度分析(島津SALD-3100)を用いて一次粒子の粒度分布を測定し, SSをフィルターごと600口で処理してVSSの測定を行った.

3. 研究結果

(1) 大授干潟における沈降・再懸濁フラックス観測結果

係留観測点(St. 4)におけるSS濃度分布および密度を図5に示す. 下げ潮に伴い底面剪断応力が増加するとともにSS濃度が増加した. 13時ころ低温・低塩分水塊のフロントが通過するが, 強い躍層は形成されておらず, 鉛直的に良く混合されている. この低塩分の水塊は高濃度のSSを含有している. このSSを高濃度に含んだ水塊は往復船による縦断観測結果によれば水深1.5m以浅に存在していたことから, この水塊が移動していることが予想された. さらに, 鉛直SS現存量すなわち鉛直SS濃度の積分値を図6に示す. 底面剪断応力の減少に応じてSS鉛直現存量の減少が起こり, 底面剪断応力の増大に伴って再度鉛直現存量の増加が起こっていた.

往復船による縦断観測によって, 満潮時に水深1.5m程度以浅で高濁度であったので, 下げ潮時の水深1.5m以下の水塊が係留観測点に到達するまでは水平分布が大きくないとみなし, 水平移流の影響を無視して再懸濁に関する限界剪断応力を求めた. 沈降フラックスが卓越する満潮憩流時に(1)式において $E=0$ として得られたSSの沈降速度は $7.7 \times 10^{-4} m s^{-1}$ であった. 同様にLISST-100による粒径毎の沈降速度も算出したが, 全粒径一様であり, 平均すると $7.63 \times 10^{-4} m s^{-1}$ となった. これは $800 \mu m$ 程度のマクロブロックの沈降速度に相当するが, 本観測時にはLISST-100で計測できない粗大なマクロブロック(推定 $800 \mu m$ 程度)が生じ, 一様に沈降していた可能性がある. 以上より $w_s = 7.63 \times 10^{-4} m s^{-1}$ として, 底面剪断応力 τ^* (Pa) と再懸濁速度 E ($kg m^{-2} s^{-1}$) を求めた. 巻き上げ限界剪断応力の $0.114 Pa$ は中川ら(2003)が熊本港沖で得た $0.0235 Pa$ よりも大きく, 底泥の質の違いが現れたと考えられた. 大授干潟での再懸濁フラックスは

$$E = \begin{cases} 0 & (0 \leq \tau^* < 0.114 Pa) \\ 9.43 \times 10^{-4} (\tau^* / 0.114 - 1) & (\tau^* \geq 0.114 Pa) \end{cases} \quad (13)$$

と表された.

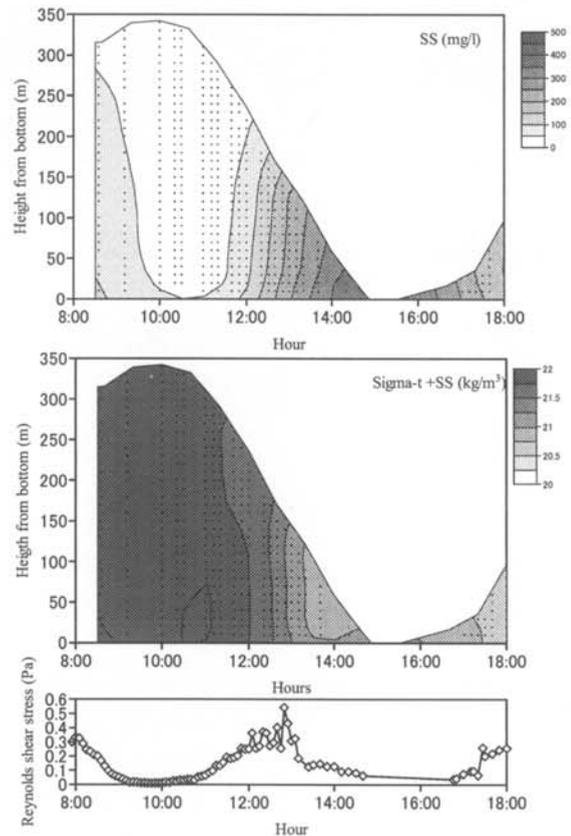


図5 SS濃度(上), 密度(中)のイソプレットおよび手印面剪断応力(下), 大授干潟, 2005年12月2日.

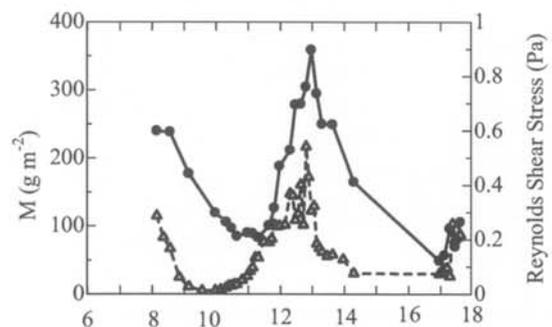


図6 水柱SS現存量(M:●)および剪断応力(RSS:□)の変動, 大授干潟, 2005年12月2日.

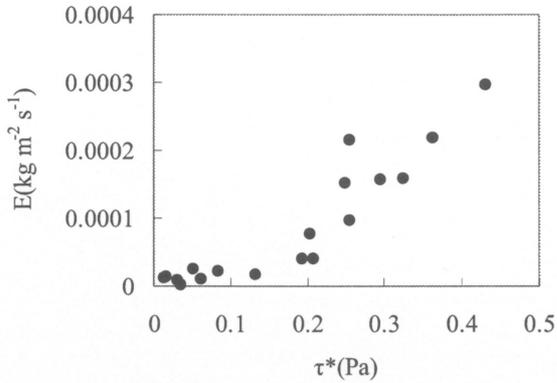


図 7 底面剪断応力 τ^* と再懸濁速度 E の関係, 大授干潟, 2005年12月2日.

熊本港での計測例に比較して流速が大きいため, 再懸濁速度も大きい. 次に底面剪断応力から再懸濁速度を推定し, 鉛直一次元的な水柱のSS現存量を推定したところ, 下げ潮時に低塩・低温の密度フロントが通過した時刻(水深 = 1.5m)を境に水平移流分とみられるSS負荷が増加した. 干潟部に存在する高濁度水塊が係留観測点を通過したと考えられた.

(2)夏季有明海西部における沈降・再懸濁フラックス計測

2006年9月5日の満潮時には低密度かつクロフィルに富む厚さ約2.5mの表層水塊と高密度かつ低濁度の底層水塊が観測されていた(図 9).

下げ潮時に底層高密度水塊は厚みを減じ, 干潮2時間前に表層水塊が海底に接触すると底面流速が 0.082 m s^{-1} から 0.173 m s^{-1} にジャンプした(図 10). このとき底面剪断応力 $\tau^* = 0.551 \text{ Pa}$, 乱流鉛直SSフラックス $J_z = 4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録した. 20分間の移動平均(4点の移動平均)をとって底面剪断応力と乱流再懸濁フラックスを比較すると, 限界剪断応力 0.0293 Pa が得られ, さらに

$$E = \begin{cases} 0 & (0 < \tau^* < 0.0293 \text{ Pa}) \\ 6.66 \times 10^{-4} (\tau^* / 0.0293 - 1) & (\tau^* \geq 0.0293 \text{ Pa}) \end{cases} \quad (14)$$

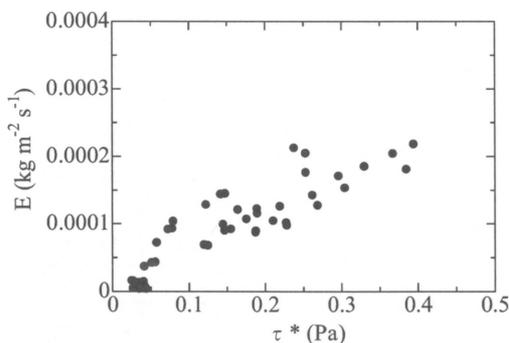


図 8 底面剪断応力 τ^* と再懸濁速度 E の関係, 浜川タワー, 2006年9月5日.

が得られた(図 8). 巻き上げ限界剪断応力は中川らを得た 0.0235 Pa と同程度となった. 大授干潟よりも低い値になっているのは, 手法上の違いの可能性もあるが, 底質の粒径が違うことによる可能性が大きい.

なお, 岩垣公式¹²⁾を適用すると, 大授干潟での観測地点付近の $D_{50} = 15 \mu\text{m}$ であったので $\tau^* = 0.012 \text{ Pa}$ と推定された. また, 浜川タワー地点での $D_{50} = 6.35 \mu\text{m}$ であるから, $\tau^* = 0.0021 \text{ Pa}$ となる. 粘着性の底泥であるために高い限界剪断応力値をとるものと考えられる. 全時間積分すると再懸濁フラックスが卓越しており, 特に上げ潮時の累積再懸濁フラックスは下げ潮を上回っていたので上げ潮の向きに懸濁物質が輸送されていたことがわかった. 14時台からも再び塩分は上昇し始めた時には, 図 10より, 上げ潮時にも $\tau_{xz} (= \tau^*)$ の増加と J_z の増加が認められた. 密度フロント通過後の16時以降にも τ_{xz} の高い状態が続いている.

再懸濁した底質には粘土粒子径の懸濁物質とともに $100 \mu\text{m}$ 以上のフロックが多く含まれており, 密度フロントによる再懸濁開始直後にフロックの濃度は高い. 干潮憩流時には細粒な粒子だけが残存し, フロックの濃度は低下する. 上げ潮時に流速が増加すると再びフロックの濃度が高まる(図 11).

(6)式によって算出された有効密度と, 粒径より(15)式に近似させてフロック密度関数とした.

$$\rho_e = \alpha d^{-\beta} \quad (15)$$

ただし ρ_e : 有効密度 (kg m^{-3}), d : 粒径, α, β : 定数. ここでフロック密度関数の推定例を, 図 12に, 表 2に $\alpha, \beta, d = 100 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m}$ のフロックの有効密度を示す. また, β について $\beta < 1.3$ を I, $1.3 < \beta < 1.4$ を II, $1.4 < \beta$ を III と分類した. なお, 有効密度は $I > II > III$ となる. 図 13は現地で観測された体積濃度分布における10%, 50%, 90%粒径の時系列変化である. 図 13において粒径の変化している時刻で, AからEに区分した. この区分とLisst-100の体積濃度分布データから, Aについては密度が大きく粗大なフロックが多く, B, D, Eは粗大なフロックとマイクロフロック, Cは密度が大きく粘土粒子とマイクロフロックを多く含んでいることが分かる. ただし, $3.9 \mu\text{m} < d$ ($8 < \phi$) を粘土粒子, $33.9 \mu\text{m} < d < 31.25 \mu\text{m}$ ($5 < \phi < 8$) をマイクロフロック, $31.25 \mu\text{m} < d$ ($\phi < 5$) を粗大なフロック ($\phi = -\log_2 d, d$: 粒径 (mm)) とした. B, D, Eにおいては, 密度フロントの通過により粗大なフロックとマイクロフロックが巻き上がったと考えられる. Cは, 底面せん断力が減少した時に再懸濁が弱まり, 沈降速度が速く, 粒径の大きいフロックが先に沈降したため, 粘土粒子とマイクロフロックの割合が増加したと考えられた.

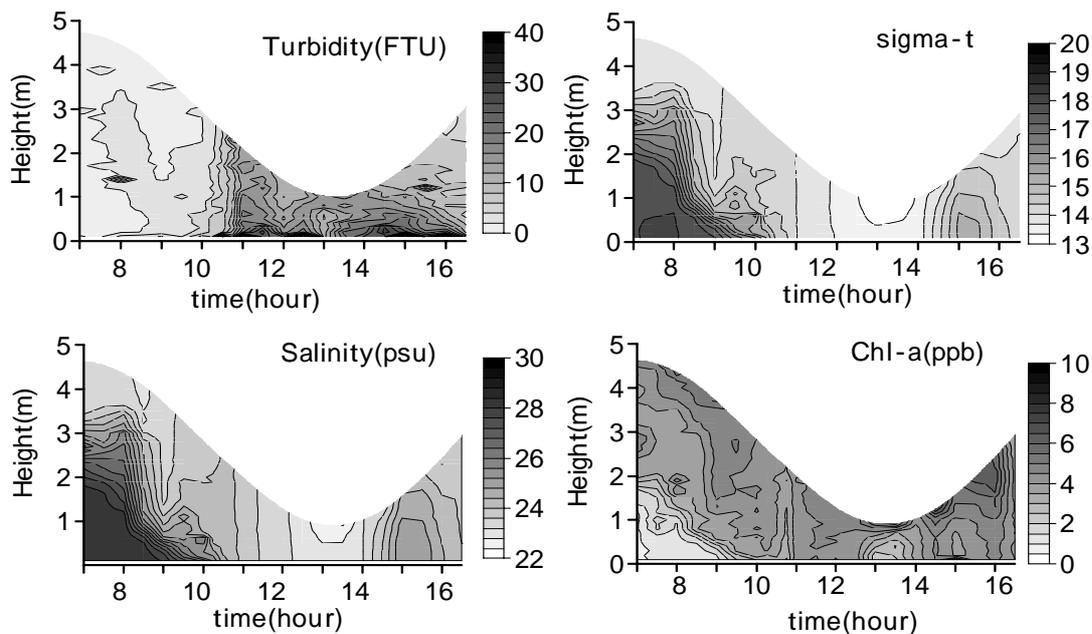


図 9 鉛直水質分布, 浜川タワー, 2006年9月5日.

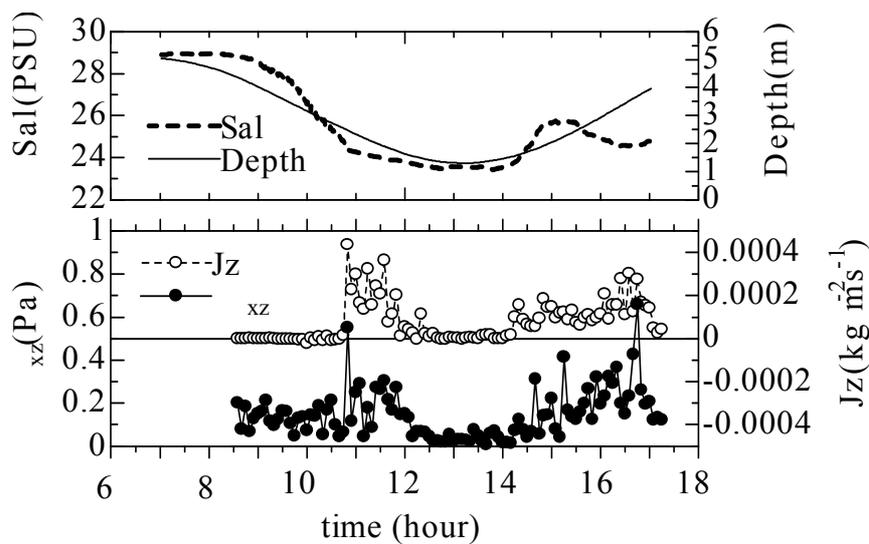


図 10 浜川タワーにおける水深・塩分(上)と底面せん断応力 $\tau_{xz}(=\tau^*)$ とSS鉛直フラックス (J_z), 浜川タワー, 2006年9月5日

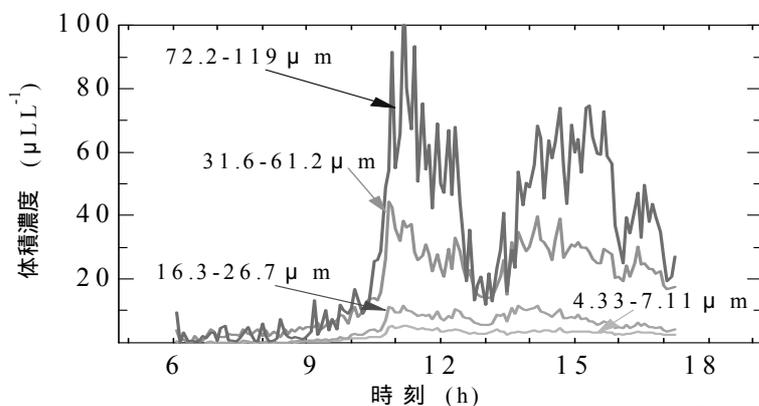


図 11 LISST-100によって計測された底面上50cmにおけるフロク体積濃度の変動, 浜川タワー, 2006年9月5日.

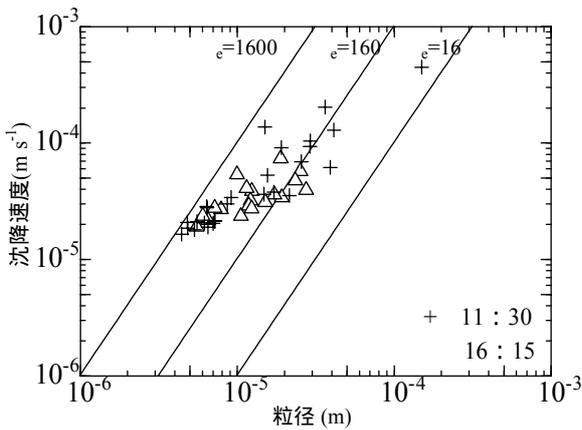


図 12 11:30と16:15のフロック密度関数, 浜川タワー, 2006年9月5日, 底面上50cm.

表 2 フロック密度関数の時系列変化 (浜川タワー, 2006.9.5)

	($\times 10^{-4}$)	(1×10^{-4}) (kg/m^3)	(2×10^{-4}) (kg/m^3)	密度区分
10:00	3.87	1.227	31.4	13.4
11:30	5.79	1.215	42.1	18.1
12:00	2.91	1.254	30.1	12.6
14:30	0.61	1.395	23.1	8.8
16:15	0.20	1.475	15.9	5.7

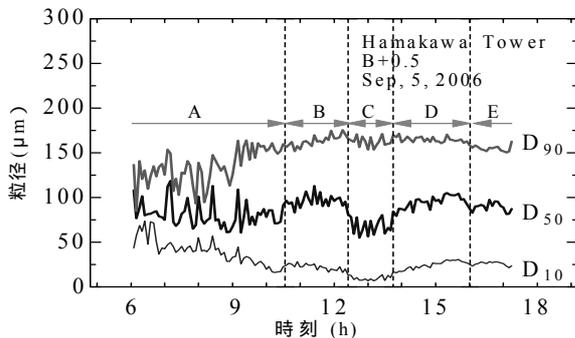


図 13 底面上50cmにおけるフロックの体積粒度分布の変動, 浜川タワー, 2006年9月5日.

底面せん断力が大きく, 濁度が高い11:00付近, 15:00付近に沈降フラックスの極大がみられる.(図 14)

沈降速度については密度が高く粗大なフロックが観察された10:30において最大値を示した.

フロックの有効密度が上げ潮と下げ潮で非対称になっているが, その理由については次のように考えられる. 下げ潮のときは低温・高塩分環境に底泥が暴露されており, この環境で形成された底質表面のフロックは低温・高塩分の内部水を含有していると考えられる. いま, この低温・高塩分の水の密度を ρ_0 , この環境中でのフロックの有効密度を ρ_e としよう. このフロックが, 密度フロントの到来により ρ_1 の低密度な水塊中に放出されたとする. そうすると有効密度は低温・高塩分水中に比べて $\rho_0 - \rho_1$ だけ高くなり, 低密度水塊中では有効密度が

$\rho_e + \rho_0 - \rho_1$ に変化する. 逆に上げ潮においてはフロックが異なる密度の水塊を経験しないので, フロックの有効密度は ρ_e である. よって下げ潮のときのフロックは密度が相対的に上昇することになる.

すなわち今回の場合, フロック密度関数の β はもともと1.4前後であると考えられる. このようにフロックの経験する水塊の密度が急変するような場合には沈降速度が急変する場合があるので注意する必要がある. 図 15に沈降フラックスと懸濁物質濃度の関係を示す. 懸濁物質濃度に対してべき乗の関係になり, 懸濁物質濃度増加と共に沈降速度が増加することがわかる.

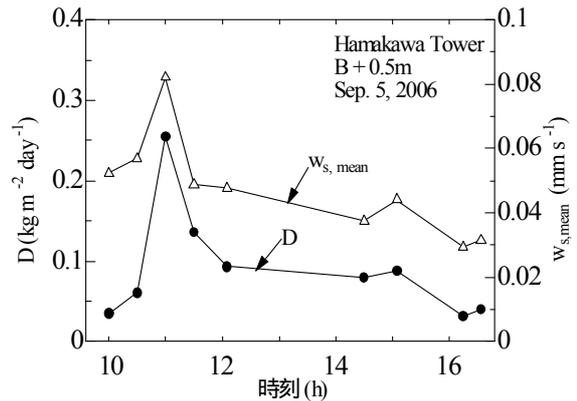


図 14 底面上50cmにおける沈降フラックスと推定沈降速度の時系列変化, 浜川タワー, 2006年9月5日.

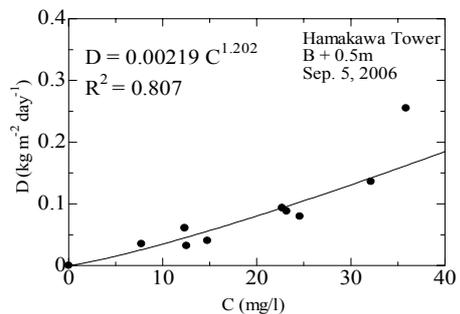


図 15 底面上50cmにおける沈降フラックスと懸濁物質濃度(C)との関係, 浜川タワー, 2006年9月5日.

4. まとめ

懸濁物質の沈降速度の実態を明らかにすることを目的とし, 有明海湾奥部浅海域において一潮汐間の観測を異なる地点で行った. 観測結果より, 密度フロントの通過時には, 底面せん断応力が大きくなったため, 小さいフロックとともに, 粒径の比較的大きいフロックも巻き上がるが, 干潮の憩流時には, 小さなフロック, および粘土粒子の割合が多かった. 沈降速度は潮時や密度フロントの存在によって影響を受けることが明らかになった. 底質の限界掃流力は湾奥でも大授干潟と鹿島沖干潟では異なり, 大授干潟の方が高い限界掃流力かつ高い剪断応力を示した. 大授干潟では底質中のシルトの混合割合が高いが, 強い潮流が底質の粒径にも影響を及ぼし

ていると考えられる。

謝辞: 株式会社イーエムエスにはLisst-100を、首都大学東京 横山勝英 准教授には超音波流速計を貸与していただいた。また、佐賀県水産振興センター、鹿島市漁業協同組合には浜川タワーでの観測を許可していただいた。また、佐賀大学理工学部古賀憲一教授には貴重なアドバイスを頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中田英昭・野中裕子, 2003. 有明海における海況の経年的な変化, 月刊海洋, Vol. 35, pp.256-260.
- 2) 大隈 齊, 江口泰蔵, 川原逸朗, 伊藤史郎 (2001): 有明海湾奥部の底質及びマクロベントス, 佐賀県有明水産振興センター研究報告, 20号, pp.55-62.
- 3) 速水祐一, 加玲美, 濱田孝治, 山本浩一, 吉野健児, 大串浩一郎, 平川隆一, 宮坂仁, 大森浩二, 2007. 有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について～2年目の成果～, 平成18年度有明海総合研究プロジェクト成果報告集(本報告集)
- 4) 山西博幸, 荒木宏之, 古賀康之, 日村健一, 大石京子, 2005. 自動昇降型水質測定装置を用いた有明海湾奥部の干潟における懸濁物質輸送と水質変動に関する現地調査, 環境工学研究論文集, Vol. 42, pp. 297-304.
- 5) 山西博幸, 日村健一, 古賀康之, 前田葵, 大石京子, 徳永貴久, 荒木宏之, 2006. 泥質干潟域における懸濁物質の沈降特性に関する研究. 環境工学研究論文集, Vol. 43, pp. 527-534.
- 6) 中川康之, 吉田秀樹, 谷川晴一, 黒田祐一, 2003. 潮汐流による底泥の巻き上げ現象のモデル化と浮遊泥量変動の再現, 海岸工学論文集, Vol. 52, 441-445.
- 7) 満田雅男, 1968. 有明海湾奥域の浮泥と干潟の消長について, 筑後川調査報告付属資料(2), 筑後川調査報告-水系開発に伴う水産業への影響調査-, 水産庁, pp7-8.
- 8) Winterwerp, J.C. and Van Kesteren, W.G.M., 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment, Elsevier.
- 9) 山本浩一, 速水祐一, 大串浩一郎, 笠置尚史, 2006. 夏季有明海湾奥における懸濁物質の粒度分布特性, 2006年度海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 128.
- 10) 小池勲夫編, 海底境界層における窒素循環の解析方法とその実際, 丸善, pp12-34, 2000
- 11) 関根正夫, 移動床流れの水理学, 共立出版, pp57, 2005
- 12) 土木学会編, 水理公式集平成11年版, 丸善, pp156, 1999

(2007.3.19受付)

佐賀地域クリーク末端における底泥直上水浄化と栄養塩

溶出抑制に関する基礎的研究

Water purification and to depress nutrients leaching at end of creek in Saga city site

原田浩幸¹, 山本浩一², 井上勝利¹

Hiroyuki HARADA¹, Kouichi Yamamoto², and Katutoshi INOUE¹

1: 佐賀大学工学部機能物質化学科 2: 有明海研究プロジェクト

ABSTRACT

The proposed system of this study sprinkles the calcium nitrate, and volcanic ash soil pellets which main contains iron oxide to sediment in creek. The sediment columns which 20cm length and 5cm width experiments are conducted. The ORP of surface of sediment by sprinkles 10g calcium nitrate is increasing from -400mV to around -200mV. The creek water on sediment in phosphate is decreasing from 1.2 to 0.2mg/l, and also nitrate is decreasing slightly. Phosphate and nitrate concentration in void water is increasing and total sulfide is decreasing. Water purification ability of 200 soil pellets evaluate as phosphate concentration decreasing in creek water using sequence batch experiments. The amounts of phosphate adsorption is increasing till 45L treatment. Total organic carbon, phosphate of creek water, and total sulfide in surface sediments in the columns is decreasing by 2.5g sprinkles soil pellets. Soil pellets have depress ability of nutrients leaching.

Key words: creek, sediments, soil pellets, calcium nitrate, nutrients

1. はじめに

農林水産省は平成17年度先端技術を活用した農林水産研究高度化事業の中で「有明海沿岸の農地からの汚濁負荷を効率的に削減することが課題となっている中、農薬・肥料等を削減した栽培技術に加え、水の滞留時間が長くその間に生活排水が混入し水質悪化しやすいといった、有明海沿岸のクリークの循環灌漑特性を踏まえた水質浄化が必要である」¹⁾として、研究助成をおこなっている。そして課題の取り組む例として休耕及び冬季水田での水生植物を利用した水質浄化技術の開発などを示した。

しかしながらこの研究課題は地域性が極めて高いので、申請が許可された研究グループの他に取り組みが少ないと思われ、他の手法によるアプローチも重要であると思われる。

佐賀地域のクリークは縦横に走っているなので、水質の特性そのものを把握することが難しい。そこで、本研究ではクリークの末端である樋門の地点でその特性を検討した。また、浄化については植物による以外の方法を検討した。考え方としては底質が浄化されれば、その上の直上水に反映されると考えた。ひとつは海底の浄化で効果をあげている硝酸カルシウムの添加であり、これは硝酸イオンリソ酸態²⁾、全硫化物の減少を目的とする。もうひとつは鉄分を多く含んだ土壌²⁾を用いる硝酸カルシウムの代替を目的とする。

2. 調査

クリークの状態を把握しやすい末端の樋門において検討した。

2.1. 調査

図1に示す調査地点において、表層の水を投げこみバケツで採取するとともに、多項目水質分析計でEC、塩分、DO、水深、ORPなどを測定した。サンプルは実験室に持ち帰り、上水試験方法³⁾により分析をおこなった。調査時期は2006年6月より2007年6月まで行った。

2.2. 結果と考察

結果を図1に示す。図中に凡例と濃度スケを示した。特に St.9,10,11,13 において硝酸態窒素濃度が高く St.9の9月10月では4.0mg/l以上の濃度となっている。またそれ以外の地点でも9月,10月の採取かけて窒素濃度が高くなる傾向にある。リン酸態リンについては St.9,10,11,13 において濃度が高く、また夏季においては St.1,4,5 においても約1.0mg/l以上となっている。以上のことから樋門における夏から秋にかけての西部の河川下流から沿岸に近づくにつれて、沿岸域において硝酸酸態窒素濃度が高くなる。

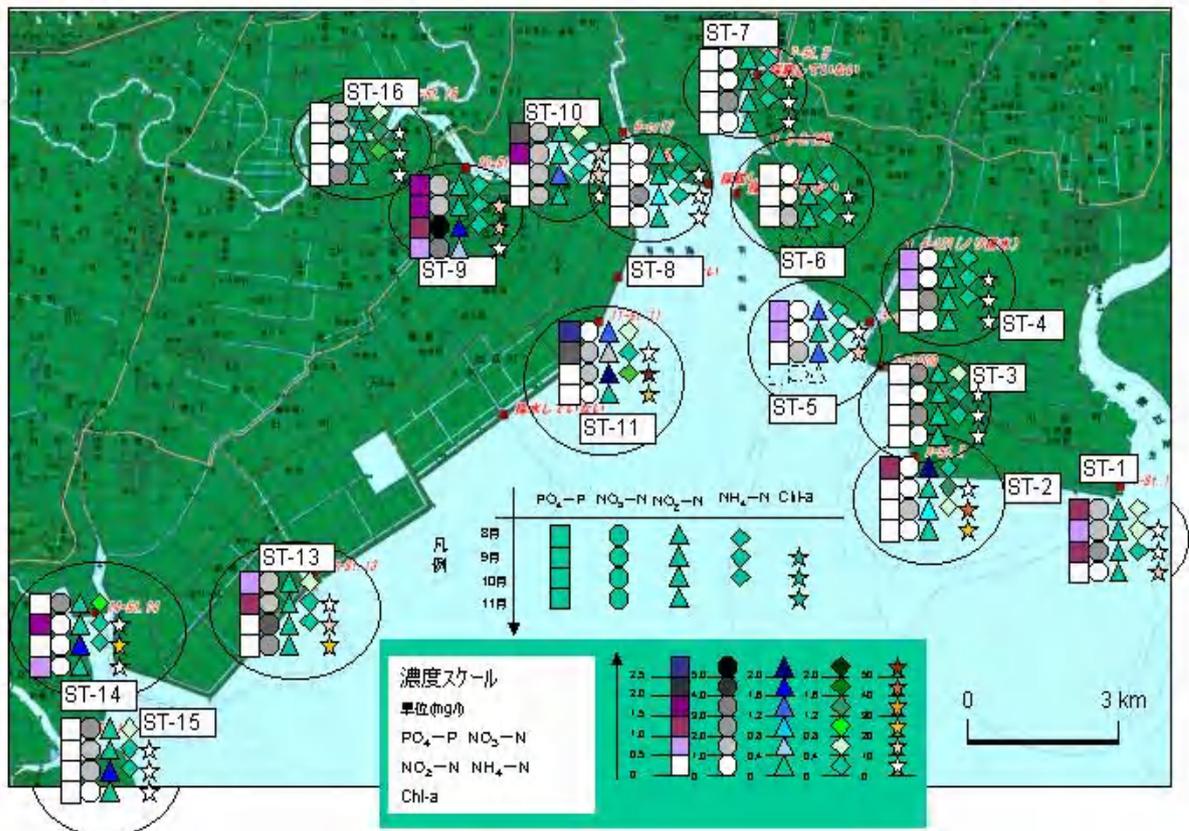


図-1 樋門における2005年度8月から11月における溶解性栄養塩濃度

汚染源は明らかにできていないが樋門の問題点として硝酸態窒素とリン酸態リン濃度が高いので対応が必要であることがわかった。

2. 硝酸カルシウム添加による底質改善

海底の底質改善として、近年注目され、実施されている事例も見られる。ここではクリークの底泥に対して適用できるかどうか検討をおこなった。

2.1 浄化実験

実験に供した底泥は図1の St 2 からエッグマンパーズ採泥器に採取し、そして引き上げた採泥器に直径 5cm、高さ 20cm の塩化ビニールカラムを突っ込んで 15cm の幅に泥を採取し底にゴム栓をして、カラムサンプルを得た。これに(株)Wako 製の硝酸カルシウムをできるだけ均一になるように3本のカラムにそれぞれ 5g, 10g, 30g を表層底泥に添加して、また対照として添加しない系をつくった。カラムは1条件につき3本作成しデータはその平均とした。これと同じ場所で採取したろ過クリーク水を底泥表面から 5cm まで注いだ。カラムは 25℃ に温度を制御した水槽に浸し、温度変化が少ないようにした。サンプリングは樋門の滞留時間が長いことを考慮して 10 日までとし、1回に 5ml の直上水を取り、希釈して分析³⁾に供した。

2.2 結果

底泥表層の酸化還元電位、リン酸態リン、硝酸態窒素の結果を図2、図3、図4に示す。ORPは対照では-500mVから-400mVの範囲にあるのに対して、10g、30g添加では200mV以上電位が増加した。対照のリン酸態リンは1.4mg/lから減少して0.8mg/lとなった。添加しているカラムでは0.2mg/l程度と濃度が低い。硝酸態窒素濃度が高いのは加えた水の濃度に起因する。硝酸態窒素は30g添加のカラムにおいて7日目からその濃度が著しく増加して9日目には17.6mg/lとなった。

一方で間隙水においては表1に示すようにリン酸態リンおよび硝酸濃度も硝酸カルシウムを添加したほうが高くなっている。海底の場合硝酸カルシウム添加により、ORPの増加は報告されており、このときには間隙水のアンモニア、硫化物イオン、TOCの減少がある⁴⁾。

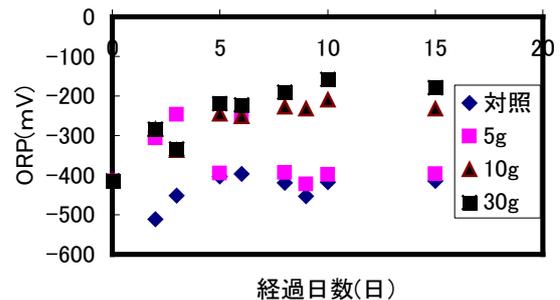


図-2 カラム試験表層底泥 ORP

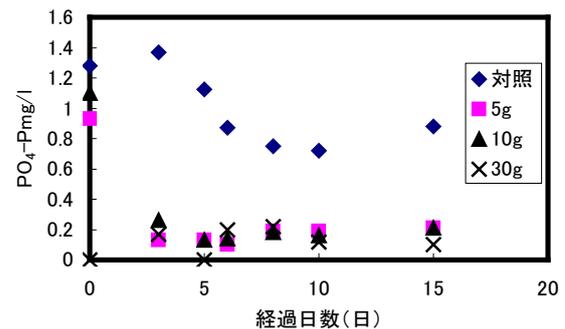


図-3 カラム試験の直上水リン酸態リン

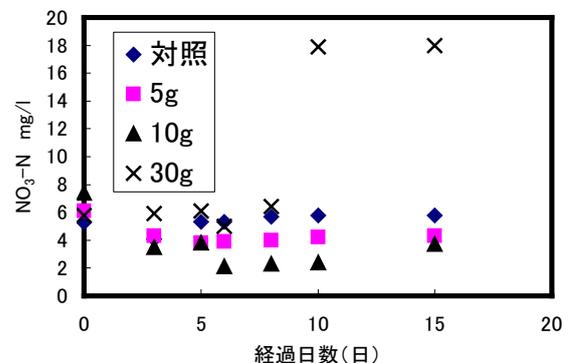


図-4 カラム試験直上水硝酸態窒素

本研究との違いは、底泥電位が上昇してもさらに-200mVほど低いので、十分に酸化の効果がみられないためと考えている。

全硫化物はほとんど検出されない状態となった。以上のことからリン酸態リンと硝酸態窒素の間隙水濃度は高くなるが、底質の直上水のリン酸態リンおよび底質の硫化物低減に効果があると判断できる。

表 1 間隙水濃度

全硫化物(%)				
深さ(cm)	対照	5g 添加	10g 添加	30g 添加
0-10	0.00015	N.D.	N.D.	N.D.
10-20	0.00042	0.0006	N.D.	N.D.
20-30	0.0024	0.0002	0.0098	0.00011

間隙水 (PO₄-Pmg/l)

深さ(cm)	対照	5g 添加	10g 添加	30g 添加
0-10	0.985	1.81	1.67	1.5
10-20	0.685	1.3	1.7	1.91
20-30	0.56	0.68	0.78	1.19

間隙水 (NO₃-Nmg/l)

深さ(cm)	対照	5g 添加	10g 添加	30g 添加
0-10	0.58	8.53	5.62	2.67
10-20	0.68	0.19	7.75	1.27
20-30	0.56	0.68	0.11	0.13

3. 土壌による水質浄化と溶出の抑制

硝酸カルシウム添加により直上水および底質の硫化物については効果が認められたが、間隙水濃度が高いので、門の開閉により濃度の高い水がクリークのほうに流れたり、また海域に流れたりする可能性がある。そこで、底泥に異物とならない鉄分を多く含む土壌の利用を考えた。まず水質浄化への効果を確認し、次に底泥においての溶出抑制効果を検討した。先の硝酸カルシウムは粉末で用いたが、

現地では成型して用いられる。本研究でも同じ考え方として土壌を圧縮整形して用いる。

3.1 材料と実験方法

3.1.1 材料

化学性状を表 2 に示す。土は火山性灰土に分類でき、黄土も分類上、赤ぼく土となるが、阿蘇山の鉄分を多く含んでいる特殊な土なのでここでは区別のため黄土と称する。

表 2 土の化学性状 単位 g/Kg

	Fe	Si	Al	Ca
黒ぼく土	130	130	30	17
赤ぼく土	39	206	5.6	6.1
黄土	470	34	11	4.5

3.1.2 実験

11 の 3 つのビーカにそれぞれの黒ぼく土 200 個、赤ぼく土 150 個、黄土 180 個を入れる。空隙率は 0.55 から 0.6 の範囲にある。これに 750ml のクリーク水を注ぎ、8 時間以上静置後、静かに傾けて 600ml を回収して、その後新たに 600ml のクリーク水を注ぐ、この操作を繰り返すことをおこなった。

硝酸カルシウムの添加実験と同じような手法でカラムを採取する。1 つの条件につき 3 本のカラム実験をおこなう。これに黄土ペレットを 2.5g 投入した場合としない場合、底泥がなく水道水を注入したカラムに土壌を添加した場合、土壌の添加がなく水道水のみの場合をつくり比較した。

3.2 結果と考察

図 5 は繰り返し処理の結果を示す。いずれの土においても累積の吸着量は増加しており、飽和に達していないことがわかる。

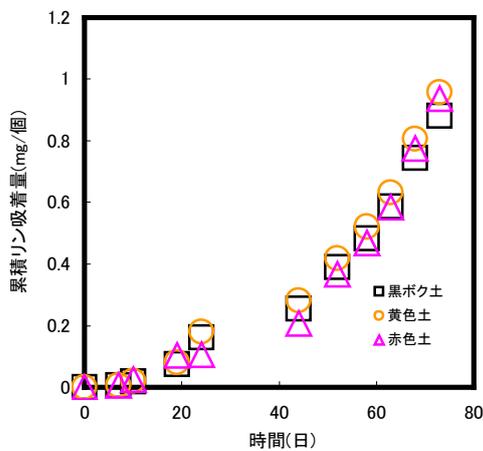


図 5 繰り返し実験

溶出抑制実験の結果を表 3 に示す。加えた水分量が少なく、また強い還元状態にあるので直上水の TOC, リン酸態リンおよびアンモニア態窒素ともいずれも濃度が高い。ペレットを投入したカラムでは有機物とリン酸態リンの減少が確認できた。また水道水は 2 週間の放置のため TOC が増加しているが、ペレットを入れたものでは約 1 / 5 に減少した。

4. まとめ

佐賀地域のクリークの特性を末端の樋門のところで評価した。その結果、佐賀地域西部

で硝酸態窒素とリン酸態リン濃度が高いことがわかった。カラムモデル実験で硝酸カルシウムの添加と土壌ペレットの添加を検討した。両方とも全硫化物およびリン酸態リンの減少に効果があることがわかった。

	カラム + ペレット	カラム (対照)	水道水 + ペレット	水道水
TOC(mg/l)	302	372	1.8	9.1
PO ₄ -P(mg/l)	6.2	10.9	—	—
全硫化物	0.02	0.085	—	—
NH ₄ -N	23.1	26.2	—	—

表 3 土壌ペレット添加による溶出抑制

参考文献

- 1) www.s.affrc.go.jp/docs/news/koubo/high_h17.htm
- 2) www.limonic.co.jp/shouhin/cler.htm
- 3) 日本水道協会：上水試験方法、2001 版
- 4) 岩井克巳、橘田隆文、石田貴子、吉永郁生、平沢浩宣：硝酸カルシウム錠剤による底質改善技術、第 41 回環境工学研究フォーラム、p19-21、2004

Water purification on sediment and to depress nutrients leaching at end of creek in Saga city site

Hiroyuki HARADA, Masafumi SHIWA, Keisuke OYAMA, Mayuko HIGUCHI,
Kouichi Yamamoto, and Katutoshi INOUE

ABSTRACT

The proposed system of this study sprinkles the calcium nitrate, or volcanic ash soil pellets which main contains iron oxide to sediment in creek. The sediment columns which 20cm length and 5cm width experiments are conducted. The ORP of surface of sediment by sprinkles 10g calcium nitrate is increasing from -400mV to around -200mV. The creek water on sediment in phosphate is decreasing from 1.2 to 0.2mg/l, and also nitrate is decreasing slightly. Total organic carbon, phosphate of creek water, and total sulfide in surface sediments in the columns is decreasing by 2.5g sprinkles soil pellets. Soil pellets have depress ability of nutrients leaching.

有明海底質細胞外ポリマーの分析とその評価に関する研究

STUDY ON THE ANALYSIS AND THE EVALUATION OF EXTRACELLULAR POLYMERIC SUBSTANCES (EPS) IN ARIAKE SEA

原田浩幸¹、大石明広¹、山本浩一²、井上勝利¹、川喜田英孝¹

Hiryokuki HARADA, Akihiro OHISHI, Kouich. YAMAMOTO, Katutoshi INOUE and Hidetaka KAWAKITA

1: 独立法人 佐賀大学理工学部機能物質化学科

2: 独立法人 佐賀大学有明海研究プロジェクト

The molecular weight distribution and the aggregation capacity of the extracellular polymeric substances (EPS) in Ariake Sea were measured in this study. The molecular weight distribution of soluble EPS was measured by ultrafiltration. The molecule with 1-3 kDa molecular weight was 55% of the whole. The batch agglutination test was carried out by varying amount of soluble EPS in marine sediments. It was observed that the particles agglutinated with the addition of soluble EPS to arbitrarily dilution.

Key Words: Ariake Sea, Soluble, extracellular polymeric substances, agglutinate test

1. はじめに

有明海異変とよばれる有明海における漁獲量の減少やのりの色落ち問題に端を発し、再生のためのいろいろな取り組みがなされるようになった。異変の原因に直結しているかどうかは、現在不明であるが、観測される事実として有明海における透明度の増加、水質 COD の増加が挙げられる¹⁾²⁾。しかし、陸域からの COD 負荷量は減少している状況にある²⁾。このことから、前者の状況は、海底域で生み出されたものと推定され、そのメカニズムは二枚貝、のり、あるいは珪藻付着した底泥から排出される細胞外ポリマーに起因していると考えられる。本研究では、有明海底泥における細胞外ポリマーについて分析を行い、評価したので報告する。

2. 細胞外ポリマー

細胞外ポリマー(EPS)は、微生物による分泌や、細胞の溶解、加水分解の形によって生成される複雑な高分子量混合物(Mw>10,000)である。

主な成分は多糖、タンパクであり、少量であるがフミン物質、ウロン酸、核酸が含まれる³⁾。

図-1 に EPS の構造関係について簡単に示す。EPS 中に微生物は埋没した形となっており、Bound EPS つまり微生物に結合した EPS は細胞と密接に関係し、一方、微生物外に付着している Soluble EPS は直接関係しない⁴⁾。

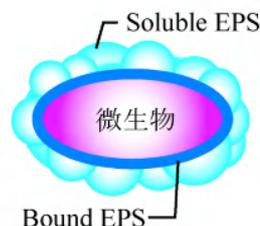


図-1 微生物と EPS の構造上の関係

EPS の抽出法について説明する。EPS の抽出法には大きく化学的抽出と物理的抽出の2つに分類される。

化学的抽出には、EDTA 抽出、ホルムアルデヒドと NaOH を用いるアルカリ抽出、グルタルアルデヒド抽出が挙げられる。

また、物理的抽出には、超音波抽出、陽イオン交換樹脂抽出、陽イオン交換樹脂と超音波を組み合わせた方法、加熱抽出、遠心分離のみを用いたコントロール法が挙げられる⁴⁾。

次に、それぞれの抽出法の原理を説明する。

①EDTA 抽出：EDTA がフロックの構造を形成しているカルシウムとキレートを作るため、フロックの強度が減少、そして EPS の可溶性が増加するため抽出が促進される。②アルカリ抽出：ホルムアルデヒドは細胞膜のアミノ、ヒドロキシル、メルカプト基を持つタンパク、核酸と反応し、細胞を固定、細胞の溶解を防ぐ。NaOH は pH を上昇させ、EPS 中の酸性グループの分離と負電荷 EPS 間の反発によって抽出する。③グルタルアルデヒド抽出：抽出挙動は解明されていない。④超音波抽出：フロックを破壊することで EPS を抽出する。⑤陽イオン交換抽出：フロックの構造を形している二価の陽イオンの除去とせん断応力の組み合わせによって EPS を抽出する。⑥加熱抽出：高温になると EPS の性質に影響を与えるため、あまり用いられない。⑦コントロール法：遠心分離のみで EPS の水溶性成分のみを抽出する。

一般的に物理的抽出を用いるよりも、化学的抽出を用いた場合の方が、抽出された EPS 中の多糖やタンパクの量が多くなる。これは、試薬による細胞の溶解や EPS の汚染が起こるためである。また、コントロール法以外の物理的抽出では Soluble EPS だけではなく、Bound EPS まで抽出される。本研究では有明海に対する EPS の影響を評価するため、EPS の汚染がなく、水溶性成分のみを抽出できるコントロール法を用いることとした⁵⁾。

3. 実験

凍結乾燥させた有明海干潟底泥を蒸留水に懸濁させ、4,000×g、4℃ で 20 分間遠心分離した。その後、底泥から EPS を分離するため 20,000×g、4℃ で 20 分、10,000×g、4℃ で 15 分間超遠

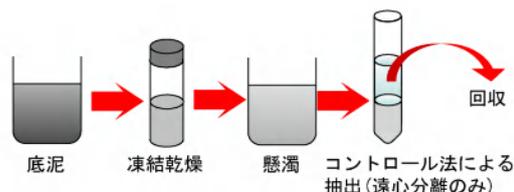


図-2 底質からの EPS 回収方法

心分離し、上澄みを回収した⁵⁾。次に、回収した EPS の分子量を測定するため、限外ろ過による分子量分画を行った。回収した EPS 水溶液 3 ml を Amicon Ultra-4 (MILLIPORE) に入れ、適正な条件で遠心分離を行った。

分子量 30,000 以上で各分の重量が少なく、タンパクの分析ができなかったため、ゲルクロマトグラフィーを用いてタンパクの分析をおこなった。測定条件を表-1 に示す。

表-1 測定条件

カラム	TSKG3000SW _{XL} (4.6 mm I.D.×30 cm)
溶離液	リン酸緩衝液
流速	0.5 ml/min
検出器	UV

5 分間ごとに分取した EPS 溶液を蒸留水で 15 倍希釈し、TOC-V(島津製作所)用い、NPOC 法によって全有機炭素(TOC)を測定した。

また、EPS による懸濁物質の凝集について考察するため、干潟の乾燥底泥を用いてジャーテストを行った⁶⁾⁷⁾。650 nm における吸光度の測定は UV-260(shimadzu)を用いて行った。急速攪拌 140 rpm、5 分間、緩速攪拌 20 rpm、15 分、静置 15 分とした。試料の条件を表-2 に示す。

表-2 凝集試験試料の調整

乾燥底泥	0.020 g
EPS 水溶液 (40 倍希釈)	10 ml
人工海水	90 ml

4. 結果と考察

限外ろ過により分離した結果を図-3 に示す。干潟底泥 EPS を含む水溶液のうち約 72 % の分子は分子量 10,000 以下であった。しかし、本研究では EPS を分子量 10,000 以上の高分子と定義しているため、これらの分子は除外することとした。分子量 10,000 ~ 30,000 の分子が約半分を占めており、30,000 以上での分子量は 13 % ~ 18.8 % という値となった。

次に、限外ろ過によって分画した溶液を標準として、採取時の底質の ORP が既知のサンプルを測定した。ORP の違いは採取場所の違いを反映している。また、ゲルクロマトグラフィーの結果を図-3 に、標準タンパクを用いて作成したカラムの校正曲線を図-4 に示す。

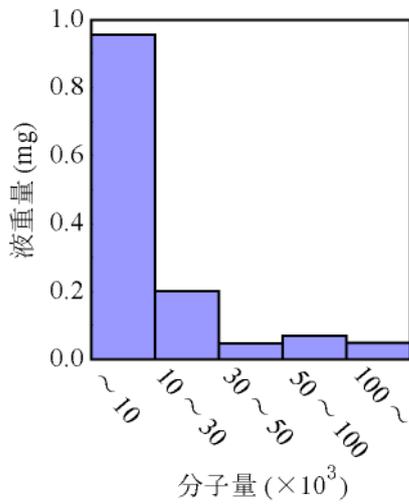


図-2 分子量分布

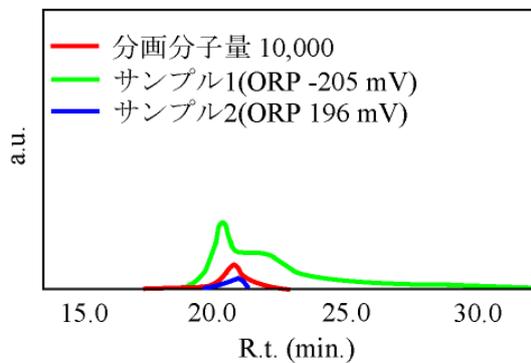


図-3 ゲルクロマトグラフィー

図-3 より分画分子量 10,000、サンプル 1、2 いずれもほぼ同じ時間に吸収が見られた。しかし、分画分子量 10,000 以外の溶液に関して 280 nm に吸収が見られなかった。また、U-3310(Hitachi) を用いて可視紫外吸収スペクトルを測定した結果を図-5 に示す。

これらの結果より、ベンゼン環由来の 280 nm における吸収が見られなかったため、干潟底泥 Soluble EPS にはベンゼン環を持つアミノ酸(トリプトファン、チロシンなど)はほとんど含まれておらず、200 nm 付近に強い吸収を示す物質を多く含んでいる可能性が示唆された。

図-6 に各分取サンプルの TOC の値を示す。分取時間の違いによる明確な TOC の差はほとんど見られなかったが、全分取時間の EPS 水溶液に TOC が含まれていることから、底泥 Soluble EPS は有明海における COD の上昇に関与していると考えられる。

図-6 に凝集実験の結果を、図-7 に EPS の希釈

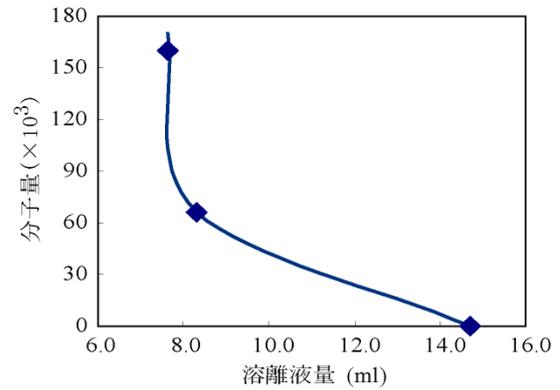


図-4 校正曲線

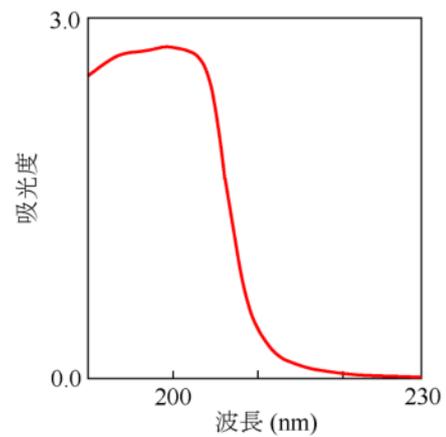


図-5 吸収スペクトル

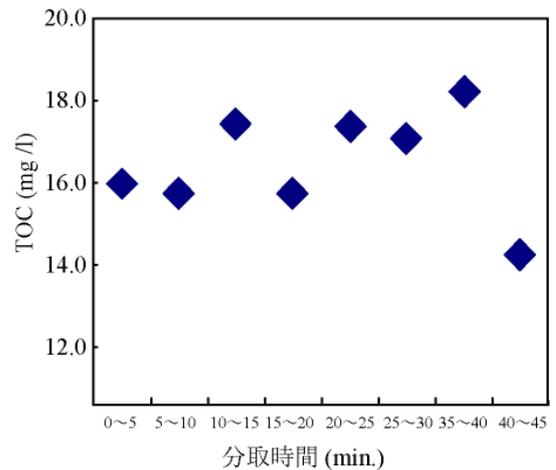


図-6 各分取時間における TOC

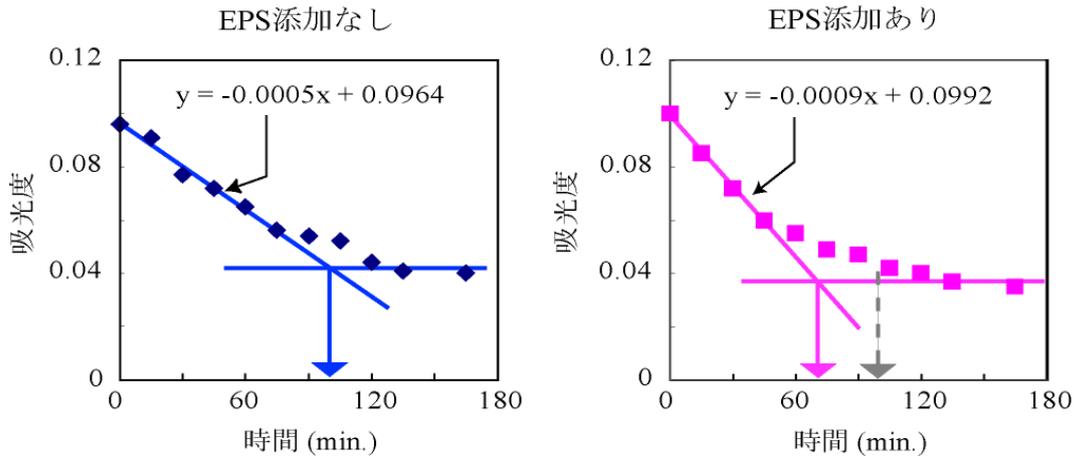


図-7 凝集に及ぼすEPSの効果

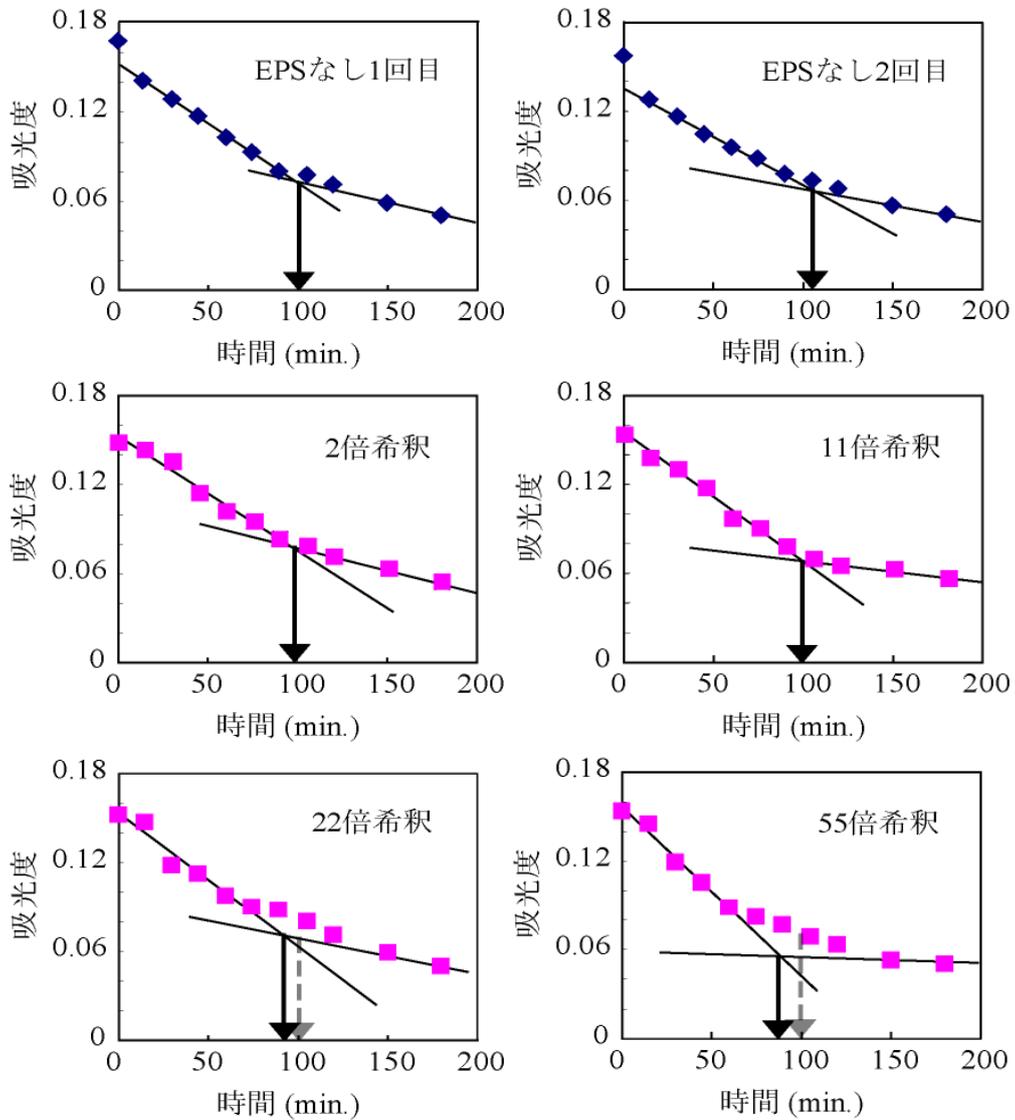


図-8 EPS希釈倍率の違いによる沈降速度の変化

倍率を変えた場合の実験結果を示す。0分からの斜線は等速沈降速度を近似しており時間に平行な線は圧密沈降を底泥沈降を示している。両近似線の交点の時間を下向の矢印で示し、EPSを添加した系では添加しない系の交点の時間を比較のために点線矢印で示してある。EPS水溶液の添加により、等速沈降速度が倍程度になっていること、交点の時間が20分程度短くなっていることから懸濁物質の凝集が起り、沈降速度が速くなっていることが考察される。また、図-8より希釈倍率22倍、55倍のとき沈降速度が速くなっているが、希釈倍率2倍、11倍のEPS水溶液を添加したときは沈降速度にほとんど変化が起らなかった。原因はEPS濃度が高いときにはタンパクの持つ負電荷が大きくなり、懸濁物質粒子の反発が強くなって粒子の凝集を妨げるためであると考えられる⁸⁾。

8) Z.H.Li,T.Kuba,T.Kusyda,Enzyme and Microbial Technology 38 (2006) 670-674

5. まとめ

- ・ 水溶性 EPS には低分子量の分子が多く存在しているが、有明海の COD の上昇には全ての分子量の分子が関与していると考えられる。
- ・ EPS は懸濁物質の凝集・沈降に関与しているが、濃度の高いところでは粒子の電荷の反発が大きくなり、凝集は起らないと考えられる。
- ・ 底質 EPS が懸濁物質の凝集・沈降に関与し、有明海の透明度上昇につながっている可能性は証明できた。

参考文献

- 1) H.Yamanishi, H.Araki, K.Koga, K.Satou, Environmental Engineering Research. Vol.39. 2002
- 2) 有明海・八代海総合調査評価委員会 報告書 <http://www.env.go.jp/council/20ari-yatsu/rep061221/all.pdf>
- 3) G.P.Sheng,H.Q.Yu,Z.YueInternational,Biodeterioration&Biodegradation (2006) www.elsevier.com/locate/ibiod
- 4) S.Comte, G.Guibaud, M.Baudu, Process Biochemistry 41 (2006) 815-823
- 5) S.Comte, G.Guibaud, M.Baudu, Enzyme and Microbial Technology 38 (2006), 237-245
- 6) 衛生工学実験指導書【プロセス編】，土木学会，1964, 1-2
- 7) 水質環境工学 一 下水の処理・処分・再利用一，技法堂出版株式会社 (1993) 174-187

有明海奥部浅海域のベントス相の長期的変動

A long-term change in the macrobenthic fauna of the inner part of Ariake Sea

吉野健児¹・山本浩一²・速水祐一³・濱田孝治²・上野大介⁴・大串浩一郎⁵
Kenji YOSHINO, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA, Daisuke Ueno,
Koichiro Ohgushi

¹水博 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト研究機関研究員 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³工博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農博 佐賀大学講師 生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³工博 佐賀大学助教授 理工学部 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

We investigated the benthic fauna in the subtidal zone of the inner part of Ariake Sea in August 2006. From 48 stations, sediment samples were taken with a Smith-Mcintyre grab. The sediment samples were sieved with a 1mm mesh, and the residue was fixed with 10 % formalin solution. In the laboratory, benthic organisms were sorted, identified and weighed by their wet weight. These data were compared to the data collected in 1989. Benthic fauna in 2006 was dominated by bivalves and polychaetes as in 1989, but their abundance decreased drastically than those in 1989: bivalves and polychaetes were 30% and 50 % abundance in 1989, respectively. Overall species richness also decreased, and in particular the number of species in bivalves and crustaceans declined to 30% and 40% of 1989, respectively. In addition, overall biomass decreased to about 50% of 1989 level. The benthic fauna of the inner part of Ariake Sea has clearly deteriorated, which situation would be due to bottom hypoxia that occurs in summer.

Key Words: benthic faunas, hypoxia, inner part of Ariake Sea, subtidal zone

1. はじめに

有明海は産業上重要な水産資源をはじめ、特産種、準特産種が約80種も生息する極めて貴重な内湾である¹⁾。これら特産・準特産種の多くは我々の生活とは直接関係のないベントスと呼ばれる無脊椎動物で占められている。ベントスは底生魚介類の餌資源として重要であり²⁾、竹崎ガニとして知られるガザミなどのワタリガニ類やハゼクチはベントスを主要な餌としている^{3), 4), 5)}。有明海からもたらされる恩恵は、ベントスの豊かさによって支えられてきたといってもよい。

ベントスは底層の有機物浄化の最初のステップであるフィルターとしての機能をもつ。最終的にベントスが捕食や漁獲によって系外へ取り除かれ、系は浄化される。有明海はこれらのベントスによる有機物の貯留とそれを利用する人間の漁獲による海域からの取り上げがうまく

バランスを保ち、過度な富栄養状態になることもなく、生産力の高い宝の海として機能してきた。

しかし、近年の有明海はタイラギやアゲマキ、アサリ、サルボウなどの有用種の漁獲量減少をはじめ様々な異変が生じている⁶⁻⁸⁾。このような異変解明の手がかりとして環境指標ともなるベントスの調査は不可欠である。にもかかわらず有明海湾奥部でベントス相が調査された例は古賀⁹⁾、大隈ら¹⁰⁾があるものの、基礎的情報は未だ乏しい。本研究では湾奥部での近年のマクロベントス相の記載を行い、古賀による1989年データとの比較から生物生息状況がどう変化したのか、現状把握を試みた。

2. 材料と方法

(1) 調査地

有明海湾奥部の浅海域にFig. 1に示すように48地点を設定した。湾奥部はその底質環境から西側の泥底域、東側の砂泥域に大きく分けられる。近年湾奥部では底質の細粒化が問題となっている¹⁰⁾。より最近の湾奥部の底質環境については山本ら¹¹⁾に示されている。

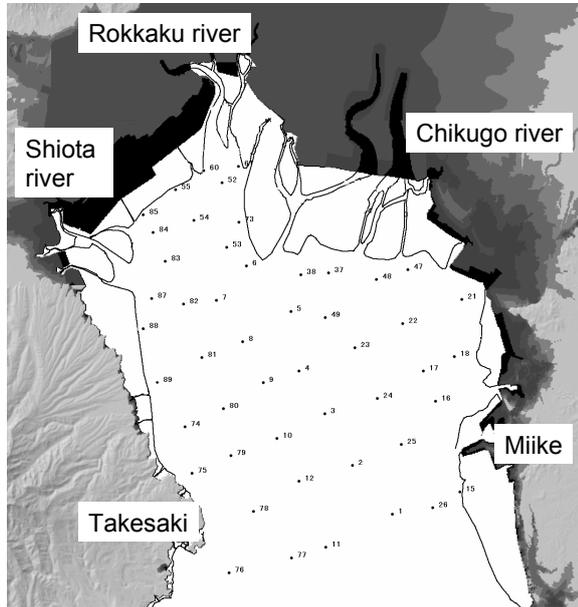


Fig. 1. The location of sampling station.

(2) サンプリング

ベントスの採集はスミス・マッキンタイヤ型採泥器（採集面積 $25 \times 25 \text{ cm}^2$ ）を用いて上述の各100地点で1回の採泥により行った。採取された泥は1 mm目合いのメッシュでふるい、ベントスをより分け、ローズベンガルを溶かした10%フォルマリンで固定した。ベントスサンプルは実験室でソーティングの後可能な限り種までの同定を行い、個体数、湿重量（二枚貝や腹足類は殻付き）を計測した。

(3) データ解析

1989年データとの比較は古賀⁹⁾の論文中のTable 4にある全ベントス個体数と主要分類群の偏組成率データに基づいた。ただし干潟域2地点のデータは除外した。全ベントス個体数と偏組成率から主要分類群の個体数を算出し、本研究と比較ができるようにした。また誤って記載されたとみられる相対頻度の和が100%を超えた3地点も解析から除外した。結果、本調査の48地点、1989年の浅海域75地点の個体数、組成データが比較された。また本調査でサルボウの養殖場となっている地点⁷⁾（地点54, 55, 84, 85, 87）から出現したサルボウは解析から除外した。個体数データは基本的にlog変換の後one-way ANOVAを、組成データはarcsine変換後にrepeated measures ANOVAを用いた。変換により不等分散が改善された場合は有意水準を5%とし、改善しなかった場合は1%とした。

現存量の比較は1989年の概算に従い、1 g 以上のサル

ボウは解析から除外した。1989年データには推定現存量の誤差の記載がないため統計解析にはt-testを用いた。

主要ベントスの分布域の比較を行うため、出現地点の割合を比較した。分布域については対象海域をできるだけ同一にするため、1989年では対象とされていない三池港沖の東部海域の地点18, 21, 47を除く本調査の浅海域45地点と1989年の78地点で比較した。またサルボウについては1989年のデータではさらに塩田川、六角川河口付近の海域も含まれていないため、これらの海域に対応する8点（52, 54, 55, 60, 61, 73, 84, 85）、上述の東部海域の3地点を含む計11点を除く本調査37地点と古賀の論文の図から計測される64地点からのベントス出現地点の割合の違いを比較した。統計解析にはG-testを用いた。採集地点が多いほど出現地点に当たる確率は高くなると考えられるため、本調査での地点数の少なさを考慮して有意水準は1%で扱った。

3. 結果

(1) 湾奥部浅海域のマクロベントス相

種レベルまで同定できたものは主な分類群でそれぞれ多毛類50種、甲殻類26種、軟体動物22種（腹足類8種、二枚貝類13種、掘足類1種）であり、棘皮動物では干潟域と同様トゲイカリナマコ*Protankyra bidentata*1種とクモヒトデ類のみが出現し、その他では扁形動物や紐型動物などが2~3地点から得られたにすぎなかった（平均密度1個体/m²以下）。また泥質域では、生物が全く採取されなかった地点が2点あった（地点52, 87）。底質毎で見れば泥質域では地点あたり平均 6.6 ± 1.1 種類（ $\pm \text{SE}$ ）、砂泥域では 15.3 ± 2.3 種が出現し、これらには有意な違いが認められた（ANOVA, $F_{1,46} = 12.6, p < 0.001$ ）。

個体数は砂泥域の全マクロベントスで平均 2251.3 ± 577.9 個体/m²、泥質域は 918.2 ± 254.5 個体/m²でほぼ有意に異なり（ $F_{1,46} = 7.03, p = 0.011 > 0.01$ ）、分類群毎でも腹足類と多毛類を除いて底質によって有意、または有意に近い違いがみられた（二枚貝, $F_{1,46} = 5.12, p = 0.028 > 0.01$; クモヒトデ類, その他: $F_{1,46} > 8.49, p < 0.0055$; Fig. 2a）。しかし分類群での平均編組成率は砂泥域、泥質域で有意な違いはなく（repeated measures ANOVA, $\text{taxa} \times \text{bottom type}: F_{5,230} = 1.69, p = 0.14$ ）、どちらもシズクガイ*Theora fragilis*やチヨノハナガイ*Raeta pulchellus*などの二枚貝とイトゴカイ科*Capitellidae* spp.、スピオ科多毛類のイトエラスピオ*Prinospio pulchura*やヨツバナスピオB型*Paraprinospio* sp.などが卓越していた（Fig. 2b, Table 1）。その他の二枚貝では砂泥域でホトトギスガイ類*Musclista* spp.やシオフキ*Mactra quadrangularis*が比較的多く出現し、多毛類では特に泥質域でダルマゴカイ科のダルマゴカイ*Sternaspis scutata*、砂泥質域でパラオニス科の*Paraonis* sp.が多く出現したほか、ミズヒキゴカイ科の*Chaetozone* sp.

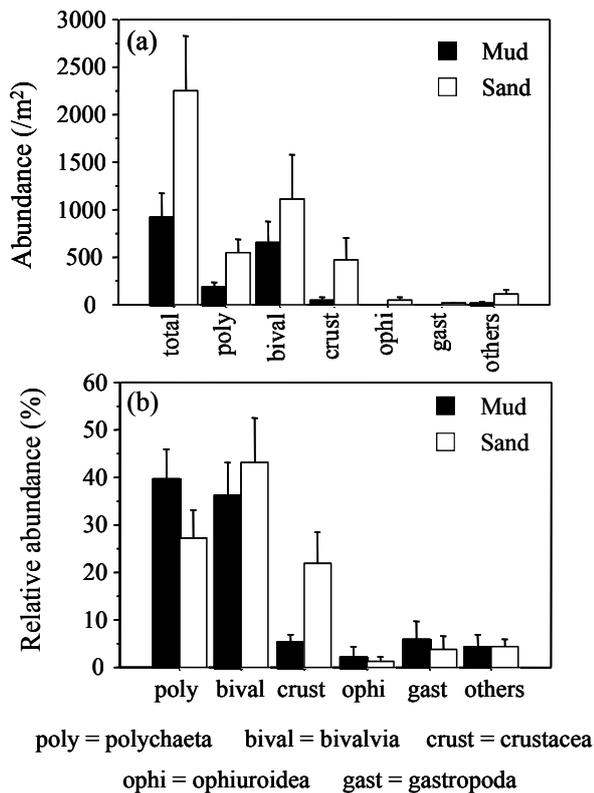


Fig. 2. Mean abundance (a) and relative abundance (b) in the subtidal area of mud and sand bottom

やモロテゴカイ科のモロテゴカイ *Magelona japonica* は底質によらず多く出現した。甲殻類ではヨコエビ類が個体数の大部分を占め (Table 1)、カマキリヨコエビ科のホソツツムシ *Cerapus tubularis* が2地点で局所的に大量に出現した他は、イシクヨコエビ科の *Photis* sp. やスガメソコエビ科のクビナガスガメ *Ampelisca brevicornis*、メリタヨコエビ科のドロヨコエビ *Nippopisella nagatai* などが優占していた。巻き貝類は全般的に個体数が少なく、その他では砂泥域でクモヒトデ類、泥質域でトゲイカリナマコ *Protankyra bidentata* が多く出現した (Table 1)。

サルボウを含めた浅海域の全マクロベントスの平均現存量は 120.5 g/m^2 であり、このうち約85%が二枚貝によるものであった。重量 1 g 以上のサルボウを除外すると全マクロベントスの平均現存量は $55.2 \pm 58.1 \text{ g/m}^2$ となった。

底質によって各分類群の平均現存量に有意な違いはなかったが (ANOVA, all $F_{1,46} < 1.63$, all $p > 0.21$; Fig. 3a)、養殖場地域にあたらぬ砂泥質域では全マクロベントスの平均現存量は $78.4 \pm 41.3 \text{ g/m}^2$ で、このうちの約45%が二枚貝であった (Fig. 3b)。1 g 以上のサルボウを除いた泥質域での平均現存量は $42.5 \pm 10.7 \text{ g/m}^2$ であり、サルボウが除外されても二枚貝が現存量に占める割合は依然大きく、平均で約40%の寄与を示した (Fig. 3b)。どちらの海域でも二枚貝のうちシズクガイ、サルボウが現存量の大部分を占めた (Table 1)。分類群の相対現存量は有意に変わらず (repeated measures ANOVA, taxa \times bottom

type: $F_{5,230} = 0.32$, $p = 0.9$)、二枚貝の次に多毛類の割合が高かった (Fig. 3b)。

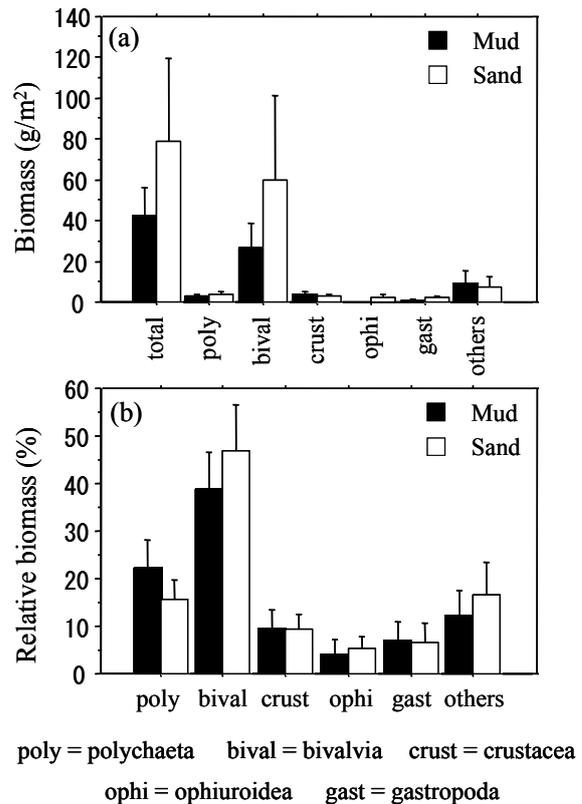


Fig. 3. Mean biomass (a) and relative biomass (b) in the subtidal area of mud and sand bottom.

(2) マクロベントス相の1989年データとの比較
 本調査での地点あたりマクロベントスの種類数は0~33種類、平均は 9.6 ± 1.2 (mean \pm SE) 種類であり、平均 30.2 ± 2.1 種類の出現がみられた1989年と比べて3分の1に低下していた (ANOVA, $F_{1,121} = 67.9$, $p < 0.0001$)。個体数においては本調査での浅海域全マクロベントス平均は 1390.3 ± 274.9 個体/ m^2 で平均 2999.8 ± 468 個体/ m^2 出現していた89年当時の半分以下に低下していた (ANOVA, $F_{1,121} = 12.8$, $p = 0.0005$; Fig. 3a)。サルボウを解析に含めても 1433.3 ± 272.3 個体/ m^2 で50%に満たない。分類群毎でも二枚貝は平均 2140.0 ± 443.7 個体/ m^2 から平均 815.7 ± 217.5 個体/ m^2 (サルボウを含めても 858.7 ± 216.2 個体/ m^2)、多毛類が平均 581.0 ± 57.2 個体/ m^2 から 312.3 ± 66.8 個体/ m^2 に減少した (二枚貝: $F_{1,121} = 10.4$, $p = 0.0017$; 多毛類: $F_{1,121} = 22.8$, $p < 0.0001$, Fig. 4a)。これらに対し、甲殻類は89年当時よりも増加したが (Fig. 4b)、これは地点17, 12で大量に出現したホソツツムシ *Cerapus tubularis* の影響が大きいためであり (Table 1)、ANOVA ($F_{1,121} = 0.81$, $p = 0.37$)、Mann-Whitney U-testのどちらにおいても ($Z = -0.86$, $p = 0.39$) 有意な違いは認められなかった。逆にクモヒトデ類では 22.0 ± 12.5 個体/ m^2 で平均値では89年当時とほとんど

Table 1. Species list in the subtidal area of mud and sand bottom: TA = total abundance, RA = Relative abundance, TB = total biomass, RB = Relative biomass

Taxa	Species	TA (ind)		RA (%)		TB (g)		RB (%)	
		Mud	Sand	Mud	Sand	Mud	Sand	Mud	Sand
Polychaeta									
	<i>Marphysa sanguinea</i>	1	0	0.3	0.0	0.268	0	5.0	0.0
	<i>Eunice</i> sp.	1	4	0.3	0.7	0.01	0.089	0.2	2.2
	<i>Diopatra sugokai</i>	0	1	0.0	0.2	0	0.468	0.0	11.4
	<i>Glycera chorori</i>	2	4	0.6	0.7	0.47	0.24	8.7	5.9
	<i>Hemipodus yenourensis</i>	11	17	3.1	2.9	0.012	0.019	0.2	0.5
	<i>Glycera</i> sp.	0	3	0.0	0.5	0	0.063	0.0	1.5
	<i>Goniada japonica</i>	1	0	0.3	0.0	0.287	0	5.4	0.0
	<i>Micropodarke dubia</i>	3	4	0.8	0.7	0.002	0.004	0.0	0.1
	Nereididae sp.	1	1	0.3	0.2	0.012	0.001	0.2	0.0
	<i>Ceratonereis erythraeensis</i>	1	0	0.3	0.0	0.006	0	0.1	0.0
	Phyllodocidae sp.	0	4	0.0	0.7	0	0.001	0.0	0.0
	<i>Genetyllis</i> sp.	2	11	0.6	1.9	0.001	0.036	0.0	0.9
	<i>Anaitides</i> sp.	2	1	0.6	0.2	0.177	0.002	3.3	0.0
	<i>Phyllodoce</i> sp.	1	0	0.3	0.0	0.000	0	0.0	0.0
	Syllinae sp.	1	11	0.3	1.9	0.001	0.008	0.0	0.2
	<i>Nephtys</i> sp.	3	11	0.8	1.9	0.011	0.031	0.2	0.7
	<i>Paraprinospio</i> sp. (B)	67	16	19.0	2.8	0.432	0.028	8.0	0.7
	<i>Prinospio paradisea</i>	1	32	0.3	5.5	0.01	0.015	0.2	0.4
	<i>Prinospio pulchra</i>	49	48	13.9	8.3	0.021	0.021	0.4	0.5
	<i>Pseudopolydora kempfi</i>	0	2	0.0	0.3	0	0.001	0.0	0.0
	<i>Aonides oxycephala</i>	0	1	0.0	0.2	0	0.031	0.0	0.8
	<i>Paraonis</i> sp.	3	52	0.8	9.0	0.005	0.082	0.1	2.0
	<i>Arabella iricolor</i>	0	1	0.0	0.2	0	0.004	0.0	0.1
	<i>Lumbrineris</i> sp.	5	18	1.4	3.1	0.048	0.101	0.9	2.5
	Capitellidae spp.	54	144	15.3	24.8	0.439	0.792	8.2	19.4
	<i>Leiochrides</i> sp.?	1	0	0.3	0.0	0.571	0	10.6	0.0
	Maldanidae sp.	2	5	0.6	0.9	0.039	0.043	0.7	1.0
	<i>Euclymene</i> sp.	1	5	0.3	0.9	0.045	0.231	0.8	5.7
	<i>Maldane pigmentata</i>	2	0	0.6	0.0	0.22	0	4.1	0.0
	<i>Praxirella</i> sp.	6	0	1.7	0.0	0.09	0	1.7	0.0
	<i>Axiothella</i> sp.	0	2	0.0	0.3	0	0.027	0.0	0.7
	<i>Terebellides stroemi</i>	2	8	0.6	1.4	0.06	0.198	1.1	4.8
	<i>Sternaspis scutata</i>	54	18	15.3	3.1	1.382	0.51	25.7	12.5
	<i>Chrysopetalum occidentale</i>	0	2	0.0	0.3	0	0.004	0.0	0.1
	<i>Sigambra phuketensis</i> .	13	37	3.7	6.4	0.022	0.042	0.4	1.0
	<i>Samythella</i> sp.	0	17	0.0	2.9	0	0.237	0.0	5.8
	<i>Logis bocki</i>	13	10	3.7	1.7	0.156	0.186	2.9	4.5
	<i>Euchone</i> sp.	11	18	3.1	3.1	0.003	0.044	0.1	1.1
	<i>Chaetopterus cautus</i>	1	0	0.3	0.0	0.201	0	3.7	0.0
	Lepidonotinae sp.	1	0	0.3	0.0	0.024	0	0.4	0.0
	<i>Polyeunoa</i> sp.	0	3	0.0	0.5	0	0.018	0.1	0.4
	Sigalionidae sp.	0	2	0.0	0.3	0	0.014	0.0	0.3
	<i>Sthenolais</i> sp.	2	0	0.6	0.0	0.013	0	0.2	0.0
	<i>Psammolyce</i> sp.	1	0	0.3	0.0	0.015	0	0.3	0.0
	<i>Sthenolepsis</i> sp.	1	0	0.3	0.0	0.007	0	0.1	0.0
	<i>Dorvillea</i> sp.	0	5	0.0	0.9	0	0.003	0.0	0.1
	<i>Acrocirrus validus</i>	2	19	0.6	3.3	0.003	0.166	0.1	4.1
	<i>Haploscoloplos</i> sp.	0	1	0.0	0.2	0	0.014	0.0	0.4
	<i>Paralacydonia paradoxa</i>	0	1	0.0	0.2	0	0.001	0.0	0.0
	<i>Chaetozone</i> sp.	21	21	5.9	3.6	0.098	0.13	1.8	3.2
	<i>Magelona japonica</i>	10	21	2.8	3.6	0.062	0.184	1.2	4.5
	unidentified polychaete	2	1	0.6	0.2	0.149	0.004	2.8	0.1
	total	353	581			5.37	4.089		

Table 1. Continued.

Crustacea									
Gammaridea									
<i>Photis</i> sp.	7	43	7.1	8.5	0.005	0.026	0.1	0.9	
<i>Cerapus tubularis</i>	5	288	5.1	57.0	0.002	0.325	0.0	11.8	
<i>Byblis japonicus</i>	0	15	0.0	3.0	0	0.043	0.0	1.6	
<i>Ampelisca brevicornis</i>	11	55	11.2	10.9	0.02	0.088	0.3	3.2	
<i>Idunella</i> sp.	10	5	10.2	1.0	0.014	0.008	0.2	0.3	
<i>Corophium</i> sp.	3	21	3.1	4.2	0.003	0.025	0.0	0.9	
Phoxocephalidae sp.	3	13	3.1	2.6	0.000	0.002	0.0	0.1	
<i>Maera</i> sp.	0	2	0.0	0.4	0	0.006	0.0	0.2	
<i>Grandidrella</i> sp.	4	0	4.1	0.0	0.011	0	0.2	0.0	
<i>Nippopisella nagatai</i>	26	24	26.5	4.8	0.045	0.056	0.6	2.0	
Caprellidea									
<i>Caprella</i> sp.	0	5	0.0	1.0	0	0.004	0.0	0.1	
<i>Protomima</i> sp.	0	2	0.0	0.4	0.000	0.000	0.0	0.0	
Isopoda									
<i>Cirolana</i> sp.	0	1	0.0	0.2	0	0.015	0.0	0.5	
Cumacea									
Diastylidae sp.	4	1	4.1	0.2	0.000	0.000	0.0	0.0	
<i>Eocuma</i> sp.	3	17	3.1	3.4	0.001	0.051	0.0	1.9	
Tanaida									
Apsseudidae sp.	1	5	1.0	1.0	0.000	0.007	0.0	0.2	
Macrura									
<i>Alpheus</i> sp.	0	1	0.0	0.2	0	1.242	0.0	45.2	
<i>Ogyrides striaticauda</i>	0	1	0.0	0.2	0	0.004	0.0	0.1	
Brachyura									
<i>Xenophthalmus pinnotheroid</i>	3	0	3.1	0.0	2.7	0	39.0	0.0	
<i>Tritodynamia horvathi</i>	3	0	3.1	0.0	0.846	0	12.2	0.0	
<i>Asthenognathus inaequipus</i>	4	0	4.1	0.0	1.702	0	24.6	0.0	
<i>Typhrocarcinus villosus</i>	3	1	3.1	0.2	0.655	0.394	9.5	14.3	
<i>Hexapinus anfractus</i>	7	2	7.1	0.4	0.746	0.367	10.8	13.4	
<i>Philyra heterograna</i>	1	0	1.0	0.0	0.172	0	2.5	0.0	
<i>Pinnixa balanoglossana</i>	0	1	0.0	0.2	0	0.028	0.0	1.0	
Unidentified crab	0	2	0.0	0.4	0	0.058	0.0	2.1	
	total	98	505		6.921	2.748			
Gastropoda									
<i>Philine argentata</i>	0	2	0.0	15.4	0	0.011	0.0	0.5	
<i>Adamnestia japonica</i>	1	2	14.3	15.4	0.006	0.047	0.3	2.4	
<i>Mitrella martensi</i>	0	2	0.0	15.4	0	0.301	0.0	15.1	
<i>Ringicula doliaris</i>	1	3	14.3	23.1	0.023	0.038	1.2	1.9	
<i>Iravadia elegantula</i>	0	1	0.0	7.7	0	0.007	0.0	0.4	
<i>Nassarius sinarus</i>	2	1	28.6	7.7	0.373	0.232	20.0	11.6	
<i>Nassarius succinctus</i>	2	1	28.6	7.7	0.316	0.084	17.0	4.2	
<i>Inquisitor jeffreysii</i>	1	1	14.3	7.7	1.147	1.275	61.5	63.9	
	total	7	13		1.865	1.995			
Bivalvia									
<i>Theora fragilis</i>	989	878	78.2	74.3	9.777	6.366	19.3	10.0	
<i>Modiolus metcalfei</i>	0	10	0.0	0.8	0	4.259	0.0	6.7	
<i>Modiolus elongatus</i>	0	1	0.0	0.1	0	0.762	0.0	1.2	
<i>Musculista japonica</i>	4	12	0.3	1.0	0.012	0.059	0.0	0.1	
<i>Musculista senhousia</i>	0	13	0.0	1.1	0	2.411	0.0	3.8	
<i>Pillucina pisidium</i>	3	6	0.2	0.5	0.009	0.022	0.0	0.0	
<i>Mactra quadrangularis</i>	3	51	0.2	4.3	0.413	5.509	0.8	8.6	
<i>Raeta pulchellus</i>	180	98	14.2	8.3	8.281	3.604	16.4	5.6	
<i>Scapharca kagoshimensis</i>	2	9	0.2	0.8	30.9	39.1	61.0	61.2	
<i>Solen dunkerianus</i>	4	3	0.3	0.3	0.01	0.007	0.0	0.0	
<i>Ruditapes philippinarum</i>	1	8	0.1	0.7	0.004	0.12	0.0	0.2	
<i>Paphia undulata</i>	48	71	3.8	6.0	0.631	1.593	1.2	2.5	
<i>Veremolpa micra</i>	31	21	2.5	1.8	0.599	0.033	1.2	0.1	
	total	1265	1181		50.63	63.84			

Table 1. Continued.

Others								
<i>Dentalium octangulatum</i>	0	1	0.0	1.5	0	0.057	0.0	0.5
Ophiuroidea	13	53	24.1	79.1	0.305	2.527	0.0	42.3
<i>Protankyra bidentata</i>	40	4	74.1	6.0	17.27	3.149	1.7	23.7
Nemertinea	1	1	1.9	1.5	0.007	0.036	98.2	29.6
Polycladida	0	3	0.0	4.5	0	0.036	0.0	0.3
Phascolionida sp.	0	5	0.0	7.5	0	0.342	0.0	0.3
unidentified animal	0	43	0.0	64.2	0	4.501	0.0	3.2
total	54	67			17.59	10.65		

ど違いが見られないが有意に低下しており ($F_{1,121} = 10.9$, $p = 0.0012$)、平均順位では有意に小さく (Mann-Whitney U -test, $Z = -3.3$, $p < 0.001$)、個体数を減少させた地点が多いことを示していた。その他の生物も著しく個体数が減少していた ($F_{1,121} = 19.7$, $p < 0.0001$)。

これらの分類群の平均偏組成率を比較したところ、2006年で二枚貝、多毛類の組成率がやや低下し、代わりに甲殻類の組成率が増加している傾向がみられるが、両年ともに似たような組成のパターンを示し、統計的にも有意な違いは認められなかった (repeated measures ANOVA, $\text{taxa} \times \text{year}$: $F_{4,484} = 1.49$, $p = 0.20$; Fig. 4c)。

1989年に 119.2 g/m^2 あった砂泥質域の現存量は統計的に有意ではないが約65%の $78.4 \pm 41.3 \text{ g/m}^2$ に減少した ($t_{16} = 0.98$, $p = 0.34$)。一方、1989年には 101.1 g/m^2 であった泥質域では約40%の $42.5 \pm 13.3 \text{ g/m}^2$ にまで激減し、統計的にも有意であった ($t_{30} = 4.4$, $p < 0.001$)。

二枚貝の分布状況を見ると (Table 2)、シズクガイの出現率は1989年と有意な違いはなかったもの ($G_1 = 0.0007$, $p = 0.98$)、調査した50%以上の地点で出現がみられたイヨスダレ *Paphia undulata*、チヨノハナガイ *Raeta pulchellus*、ヒメカノコアサリ *Veremolpa micra* はいずれも30%以下まで低下し (all $G_1 > 11.2$, all $p < 0.001$)、分布域が有意に減少していることが明らかになった。それぞれ20%、30%、50%以上の地点で出現していたサルボウ *Scapharca kagoshimensis* やホトトギスガイ *Musculista* spp. 類、ヨコエビ類でもそれぞれ約5% ($G_1 = 6.2$, $p = 0.012 > 0.01$)、12% ($G_1 = 6.3$, $p = 0.012 > 0.01$)、30% ($G_1 = 4.4$, $p = 0.036 > 0.01$) に低下し、有意ではないが分布域に減少傾向がみられた。

4. 考察

これまで湾奥部広域においてマクロベントス相を定量的に調査した例は少なく、湾奥部の環境が特に諫早湾締め切り以降、どう変化したかを示すデータはほとんど皆無であったといつてよい。本調査において種レベルでの同定ができなかった生物などを考慮しても2006年現在、湾奥部で採取されるマクロベントスは150種を超えないと思われる。1989年当時の206種と比較すれば最低でも50

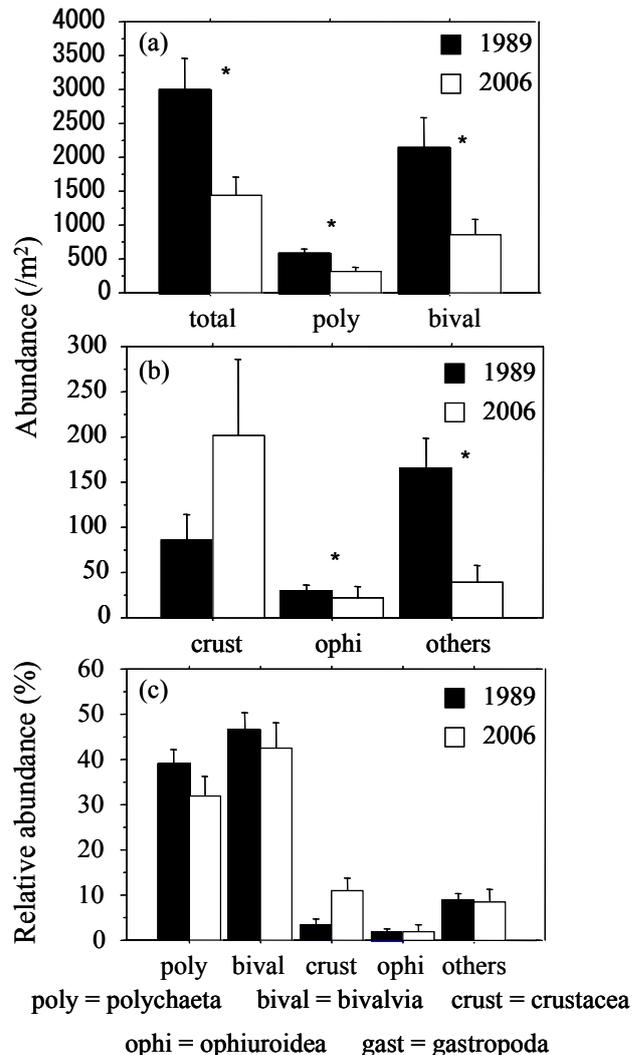


Fig. 4. Mean abundance (a), (b) and relative abundance (c) in the subtidal area of the year 1989 and 2006. The data of 1989 were based on Koga (1991). Asterisks indicate significant differences. See text for detail.

種以上が現在の湾奥部から姿を消していることになる。これに対し主要な分類群の偏組成には1989年と大きな違いはなく、種数では多毛類が優占し、個体数、現存量では二枚貝が優占する群集構造を呈した。しかしながら、特に多毛類、甲殻類、二枚貝の種数が1989年当時のそれぞれ約70%、40%、30%に低下し、地点あたりの種数でも約3分の1まで低下していた。個体数においてもマクロ

Table 2. The number of occurring stations for each species in 1989 and 2006. Note that the number of sampling stations differed between 1989 (78 stations) and 2006 (48 stations). See text for detail.

Species	Year	the number of station		occurrence (%)
		occur	not occur	
<i>Theora fragilis</i>	1989	47	31	60.3
	2006	27	18	56.3
<i>Raeta pulchellus</i>	1989	54	24	69.2
	2006	13	32	27.1
<i>Musclista</i> spp.	1989	26	52	33.3
	2006	6	39	12.5
<i>Paphia undulata</i>	1989	42	36	53.8
	2006	9	36	18.8
<i>Veremolpa micra</i>	1989	41	37	52.6
	2006	10	35	20.8
<i>Scapharca kagoshimensis</i>	1989	15	49	23.4
	2006	2	35	5.4
Gammaridea spp.	1989	43	35	55.1
	2006	16	29	33.3

ベントス全体で約50%に低下し、分類群毎では特に多毛類が約50%、二枚貝では30%にまで激減した。現存量においても砂泥域では1989年の約65%、泥質域では約40%にまで落ち込んでいる。このような様々な生態学的パラメータの減少は生物の個体群動態に伴う変動の範囲内であるとは言い難い。

主要なマクロベントスの分布にも変化がみられた。泥質域を主な分布域とするシズクガイは本調査では砂泥域でも多く出現しており、分布域を拡大している傾向がみられた。これには近年の底質の細粒化の影響もあるかもしれない。一方、現存量に大きな寄与を示していたサルボウ、1989年当時は地点あたり1000個体以上出現する地点が多く存在していたチヨノハナガイのほか、濾過食者であるイヨスダレやヒメカノコアサリなどは明らかにその分布域、密度ともに激減した。ホトトギスガイ類においても数地点で高密度な地点があるが、分布域は減少傾向にあった。富栄養化の観点からはヒメカノコアサリを除き、これらの二枚貝は比較的環境の汚染には強い種類である^{12, 13}。それにも関わらず出現地点が減少したことからも有明海湾奥部の環境が極めて悪化したことは全く疑う余地がない。

以上のような浅海域でのマクロベントスの個体数、現存量の減少については、近年湾奥部浅海域で頻発している夏期の貧酸素水塊¹⁴⁻¹⁶との関連が考えられる。貧酸素水塊は富栄養海域の宿命とも呼べる現象であるが¹⁷⁻¹⁹、富栄養化自体も大型長命種に代わって多毛類のような汚染に強い小型で短命な種を増加させ^{12, 13, 20}、結果、現存量を低下させる。湾奥部のベントスにおいてもバイオマスが大きい二枚貝や棘皮動物が減少し、日和見主義的な二枚貝であるシズクガイやチヨノハナガイ、多毛類ではヨツバナスピオ、イトゴカイ類にみられる小型

の汚染指標種の優占は富栄養海域におけるベントス群集の一般的特徴と符号する。しかしながら今回優占した汚染指標種は1989年でも同様に高い頻度で出現していた。富栄養化とベントス群集に関するより最近の総説によれば、ベントス相の変化は富栄養化自身よりもそれによって引き起こされる貧酸素水塊による影響の方が大きいことが指摘されている²¹。湾奥部への河川からの栄養塩流入量も80年代からほとんど変わっておらず¹⁴、有機物負荷の経年的な増加に伴うベントス相の小型化が本研究の生物量の減少を招いたとは考えにくい。ベントス全体の個体数密度、現存量がともに低下していることから貧酸素水塊の影響が強く示唆される。今後、実際に貧酸素水塊が湾奥部のマクロベントス相に与える影響を評価するため、貧酸素水塊発生前後の時期を含むベントス相の季節変動について詳細に調べる必要があるだろう。

近年の有明海の主要問題である赤潮と貧酸素水塊¹⁴の観点からは特に濾過食二枚貝の分布様式や現存量は重要である。濾過食二枚貝は懸濁物の堆積速度や周囲の群集構造に影響を与えるだけでなく²²、栄養塩循環や植物プランクトンの増殖抑制に大きな役割をもつ²³。濾過食二枚貝が植物プランクトンの増殖を十分制御するためには、水深が2~10 mの浅場に二枚貝が広域に高密度に分布し²⁴、かつ海域が成層化せず、よく混合していることが望ましい^{25, 26}。二枚貝が高密度に分布し、水深が10 m以浅の海域が約半分を占める湾奥部はそのような条件を満たし、湾奥部海域そのものが大きな水質浄化槽として機能していたはずである。しかしながら今回明らかになったように濾過食二枚貝の激減に加え、近年の有明海湾奥部、特に西方の泥質海域では諫早湾堤防締め切りが原因とみられる潮流の弱まりで成層化しやすくなってしまった^{16, 27}。現在の湾奥部浅海域は植物プランクトンの制御機能が大きく毀損されている状況にあると考えられ、赤潮の大規模化やそれに伴う貧酸素水塊発達にも影響している可能性がある。

5. 結論

本調査では湾奥部のマクロベントス相の現状把握を目的としており、過去データとの比較のためほぼ同時期に調査された夏期のデータのみを示した。湾奥部の環境は明らかに荒廃した。1989年当時に比べ種数が大きく低下し、個体数、現存量も激減していることがその証拠である。繰り返しになるが、湾奥部は海域そのものが大きな水質浄化槽のようなものである。また有用種の稚仔魚のゆりかごとしても重要である。湾奥部環境の荒廃は浄化機能を低下させるだけでなく、そこに生息する生物を餌とする高次消費者の生産性にも影響が波及する可能性がある。有明海全体の再生のためにも早急な湾奥部環境の再生と保全の対策が望まれる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、熊本県立大学堤裕明教授にはサンプル同定でご協力を頂いた。佐賀大学理工学部の笠置尚史、安江洋介両氏、森部南さん、中村百合恵さんには調査でご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 佐藤正典・田北徹：有明海とはどんなところか，佐藤正典編，有明海の生きものたち，海游社，2000。
- 2) 西川潤・園田武：底生魚類の餌生物としてのベントス，林勇夫・中尾繁編，ベントスと漁業，恒星社厚生閣，2005。
- 3) 松井誠一・萩原洋一・藤紘和・塚原博：ガザミ *Portunus trituberculatus* (Miers)の摂餌生態に関する研究，九大農学芸誌，40，175-181，1986。
- 4) Wu R.S.S and Shin P.K.S.: Food segregation in three species of portunid crabs. *Hydrobiologia* 362, 107-113, 1998.
- 5) Kuno Y. and Takita T.: The growth, maturation and feeding habits of the gobiid fish *Acanthogobius hasta* distributed in Ariake Sound, Kyushu, Japan. *Fish. Sci.*, 63, 242-248, 1997
- 6) 藤井明彦，山本憲一：諫早湾におけるタイラギ・アサリの現状と問題点，月刊海洋，35: 235-240, 2003。
- 7) 真崎邦彦・小野寺隆幸：有明海湾奥部におけるサルボウの漁業実態と分布状況，佐有水研報，21, 29-36, 2003。
- 8) 伊藤史郎：有明海における水産資源の現状と再生，佐有水研報，22, 69-80, 2004。
- 9) 古賀秀昭：有明海北西海域の底質及び底生生物，佐有水試研報，13: 57-79, 1991。
- 10) 大隈斉・江口泰蔵・川原逸郎・伊藤史郎：有明海湾奥部の底質およびマクロベントス，佐有水研報，20: 55-62, 2001。
- 11) 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・宮坂仁・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一：有明海奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因，海工論集，53: 961-965, 2006。
- 12) 北森良之介：環境指標としての底生動物（2）指標生物を中心に。日本生態学会環境問題専門委員会（編），環境と生物指標2（水界編），共立出版，1975。
- 13) 菊池泰二：環境指標としての底生動物（2）群集組成を中心に。日本生態学会環境問題専門委員会（編），環境と生物指標2（水界編），共立出版，1975。
- 14) Tsutsumi, H.: Critical events in the Ariake Bay ecosystem: Clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water, *Plankton Benthos Res.*, 1, 3-25, 2006。
- 15) 速水祐一：有明海奥部の貧酸素水塊—形成気候と長期変動—，月刊海洋，39: 22-28, 2007。
- 16) 堤裕明・堤彩・高松篤志・木村千寿子・永田沙矢香・佃政則・小森田智大・高橋徹・門谷茂：有明海奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム，海の研究，2007（印刷中）。
- 17) Omori K., Hirano T. and Takeoka H.: The limitations to organic loading on a bottom of a coastal ecosystem. *Mar. Poll. Bull.*, 28, 73-80, 1994.
- 18) Diaz R.J. and Rosenberg R.: Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 33, 245-303, 1995.
- 19) Pearson T.H. and Rosenberg R.: Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 16, 229-311, 1978.
- 20) 堤裕明・井上貴子：約20年間にわたる魚類養殖漁業による大量の有機物が堆積した内湾域の海底環境と底生生物群集の特徴，日本ベントス学会誌，50，39-49，1996。
- 21) Gray J.S., Wu, R.S., Or Y.Y.: Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 238, 249-279, 2002.
- 22) Norkko A. Hewitt JE, Thrush SF and Funnell GA (2001) Benthic-pelagic coupling and suspension-feeding bivalves: Linking site-specific sediment flux and biodeposition to benthic community structure. *Limnol. Oceanogr.*, 46, 2067-2072, 2001.
- 23) Petersen J.K.: Grazing on pelagic primary producers—the role of benthic suspension feeders in estuaries, *Estuarine Nutrient Cycling: The Influence of Primary Producers*, Nielsen S.L., Banta G.T. and Pedersen M.F. eds, Kluwer Academic Publishers, pp 129-152, 2004.
- 24) Officer C.B., Smayda T.J., Mann R.: Benthic filter feeding: a natural eutrophication control, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 9, 203-210, 1982.
- 25) Koseff J.R., Holen J.K., Monismith S.G. and Cloern J.E.: Coupled effects of vertical mixing and benthic grazing on phytoplankton populations in shallow, turbid estuaries. *J. Mar. Res.*, 51, 843-868, 1993.
- 26) Lucas L.V., Cloern J.E., Koseff J.R., Monismith S.G. and Thompson J.K.: Does the Sverdrup critical depth model explain bloom dynamics in estuaries? *J. Mar. Res.*, 56, 375-415, 1998.
- 27) 宇野木早苗：有明海の自然と再生，築地書館，2006。

(2007. 3. 19受付)

有明海奥部泥質干潟の 地形・底質変動特性に関する研究

A STUDY OF BED TOPOGRAPHY AND SEDIMENT
OF INNER PART OF ARIAKE SEA

笠置尚史¹・中岡勝巳²・古賀勝喜³・吉野健児⁴・
大串浩一郎⁵・荒牧軍治⁶・山本浩一⁷

¹ 佐賀大学 大学院理工学研究科 修士課程(〒840-8502 佐賀市本庄町1)

² 佐賀大学 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番)

³ 博(工) 佐賀大学講師 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴ 水博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番)

⁵ 博(工) 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番)

⁶ 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番)

⁷ 博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番)

To clarify the sediment transport in the Ariake Sea, we studied the changes of mud properties, morphology, and suspended sediment flux in the mud coast of the Ariake Sea, Japan. In summer, strong stratification of the sea water was observed and there was not remarkable sediment transport in the offshore of the tidal flat. On approaching typhoon, muddy tidal flat was eroded and suspended sediment was transported to offshore. Newly deposited mud in the offshore of the mud coast had low viscosity and bulk density. It accumulated over 10 cm. The deposited mud was started to suspend soon after the deposition and accumulated in the mudflat. The morphology of the mudflat and suspended sediment flux were correlated.

Key Words : *sediment, typhoon, viscosity, bulk density of mud, tidal flat, morphology*

1. はじめに

有明海奥部には国内最大級の泥質干潟があり、ムツゴロウ・シチメンソウなどの貴重な生物が生息している。また、シギ・チドリ等の有数の渡来地としても重要で、ノリ養殖・アサリ・ハマグリ・クルマエビを目的とした流し網漁業などに利用されており極めて貴重な干潟であるといえる。よって、泥質干潟環境を保全することは希少生物の保全に直結する。

泥質干潟環境を支配する項目としては、底質の化学物質含有量・土砂の粒径・地盤高・底質の密度がある。これらはどれも底質に生息する生物量に影響を与える可能性があり、それぞれの変動特性や変動要因を明らかにする必要がある。

これまで砂質海岸および砂質干潟の地形変動特性

¹⁾ については国内外で古くから研究されており、知見が蓄積しつつある一方で、泥質海岸、特に粘着性底泥を有する干潟の地形変動特性についての研究は国内での知見はほとんど無い。それは、大規模な泥質干潟が有明海奥部に局在する²⁾ためと、泥質干潟上の直接測量が困難であるためであることに由来すると考えられる。従って、国内での泥質干潟の地形変動特性に関する研究を進展させる必要がある。

特に本研究では懸濁物質の動態をベースに泥質干潟の地盤高についてその変動特性や変動要因および底泥の湿潤密度と粘度を計測することにより軟泥の広域分布・季節変動を明らかにすることを目標としている。

2. 研究方法

泥質干潟の地形・底質特性を明らかにするため、以下に示す3つの調査を実施した。調査海域は佐賀県白石町沖の有明海である。図-1は調査海域である。図-2は調査海域の拡大図で、海底地形と調査測線の位置を示したものである。

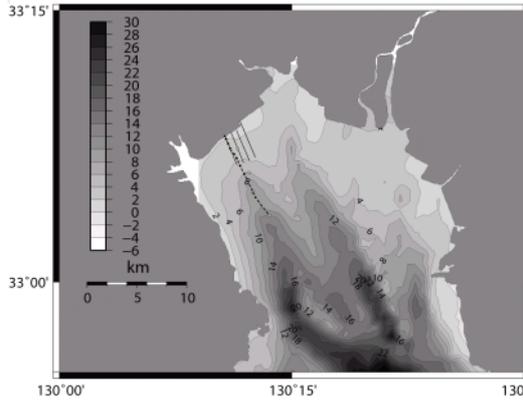


図-1 調査対象海域(佐賀県白石町沖)

(1) 海底地形測量

海底地形測量はRTK-GPS(Topcon GB-1000)測量と音響測深器(Kongsberg Maritime 製 EA400SP)を用いた深浅測量を同時に行った。RTK-GPSを利用することによって、平面座標をリアルタイムかつ高精度に測定できることに加え、高さについても最大5Hzのデータ取得が可能のため、潮汐や波による船の揺動に対応して音響測深器の位置を求めることができる。海底までの距離は音響測深器で測定する。これらを連動することにより海底の地形を継続して取得する。本調査においては、まず作業船にRTK-GPSと音響測深器を搭載し、それぞれのセンサーを舷側に固定する。RTK-GPSと音響測深器から得られるデータはノートパソコンに直接記録される。以上の準備の下、図-2に示している設定した測線を時速5~8kmで走行して水面から海底までの深さと緯度・経度座標を同時に取得した。測量は毎月1回実施した。

RTK-GPSと音響測深器によって得られたデータを用いることで海底面標高を算出することができる。海底面標高算出方法を以下に示す。

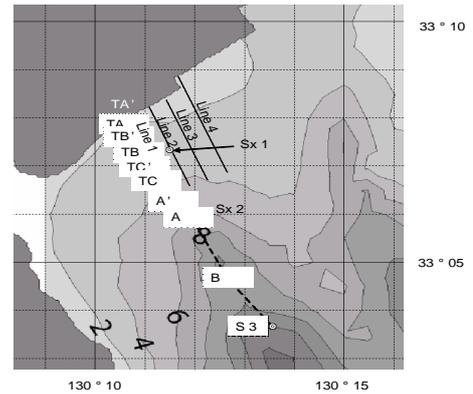


図-2 観測海域海底地形図と観測位置

$$\begin{aligned} Z &= Z_{raw} - L_c - L_{ant} - L_{offset} - D \frac{C}{C_0} \\ &= Z_{raw} - 0.0543 - L_{ant} - 0.06 - D \frac{C}{1500} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Z ：標高、 Z_{raw} ：RTK-GPSの位相中心の標高(生データ)、 L_c ：RTK-GPSのアンテナ(TOPCON PG-A1)のアンテナ定数・54.3mm、 L_{offset} ：音響測深器上面から音響測深機の発信器中心までの距離、60mm、 D ：設定音速 C_0 (=1500m/sで固定)にて音響測深器によって得られた水深、 C ：実際の音速、 C_0 ：設定音速(=1500m/s)である。

(2) 係留測定

干潟上への懸濁物質フラックスの測定のため、干潟沖合に潮流の主軸方向に沿って図-2に示したSx1(北緯33度07分19.63秒、東経130度11分29.43秒)・Sx2(北緯33度06分00.70秒、東経130度12分14.25秒)にADCP・濁度計を設置した。設置期間は2006年6月26日からとし、2007年2月現在も継続中である。計測間隔は10分間隔とした。

超音波流速計は底面から25cmにセンサーを設置し、センサーから65cmを第1層の中心とした。また、層厚は50cmとした。流速は1分間の平均値を採用し、10分間隔で計測した。なお、底面上0cm~40cmは不感距離であり測定が不可能である。濁度計は底面上25cmに設置した。

超音波流速計(Nortek Aquadopp)の反射音響強度の鉛直分布を用いて懸濁物質濃度の鉛直分布を(2)式で推定することができる³⁾。

$$EL = -20 \log r - 2\alpha r + 10k \log C + 10 \log(\rho \nu T / 2) + A \quad (2)$$

ここで、 EL : 反射音響強度 (dB), r : ADCP から測定層中心までの距離 (m), C : 懸濁物質濃度 (g/m^3), α : 減衰係数 (dB/m), ϕ : 音波のビーム幅 (sr), v : 音速 (m/s), T : パルス長 (s), κ , A は定数である。

SS フラックスの算出は $Sx1$, $Sx2$ に設置した濁度計データ, 超音波流速計の反射音響強度データから, 以下のように求めた。

$$SSF_N = 0.65\alpha \cdot Turb \cdot v_{N,0.25} + 0.5 \cdot \sum_{k=1}^n SS_k \cdot v_{N,k} \quad (3)$$

$$SSF_E = 0.65\alpha \cdot Turb \cdot v_{E,0.25} + 0.5 \cdot \sum_{k=1}^n SS_k \cdot v_{E,k} \quad (4)$$

ここで、 SSF_N : 北方成分 SS フラックス ($g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), SSF_E : 東方成分 SS フラックス, α : 定数, $Turb$: 濁度, $v_{N0.25}$: 底面上 25cm における北方流速, $v_{E0.25}$: 底面上 25cm における東方流速, SS_k : ADCP の第 k 層における SS 濃度, v_{Nk} : ADCP の第 k 層における北方流速, v_{Ek} : ADCP の第 k 層における東方流速 である。

さらに, ADCP のコンパスの西偏 $6^\circ 25'$ を考慮にいて測線方向, 測線直交方向の SS フラックスを式(5),(6)として算出した。

$$SSF_{lon} = SSF_N \cos \theta + SSF_E \sin \theta \quad (5)$$

$$SSF_{orth} = -SSF_N \sin \theta + SSF_E \cos \theta \quad (6)$$

ここで、 SSF_{lon} : 測線北方方向の SS フラックス, SSF_{orth} : 測線直交方向東方の SS フラックス, θ : 測線の磁北から時計回りの角度 である。

(3) 泥質の湿潤密度と粘度計測

干潟から沖合にかけての底質の季節変動を調査するため図-2 に示す TA' から S3 に至る測線において 2006/7/29, 9/23, 10/26, 11/25 に調査を実施した。底泥の採取にはエクマンバージ採泥器を用い, 採取した泥のうち表層 1cm を, アクリルパイプ (径 5cm) を用いて分取した。現地では泥温, 粘度の鉛直分布, 酸化還元電位 (ORP) の鉛直分布を測定した。粘度は船上で回転粘度計 (東機産業, TVC-5) を用いて測定した。底質は非擾乱状態でステンレス製小型バットに移し, 鉛直 3 層から 5 層の粘度を測

定した。なお回転粘度計は回転体が底質を摩擦するので測定を継続するとそのチキソトロピックな性質により普通粘度が次第に低下する。そこで測定開始後の極大値を採用した。この方法で測定された粘度の高い底泥 ($100Pa \cdot s$ 程度) は締め固まった印象であり, 粘度の低い底泥 (たとえば $10Pa \cdot s$ 以下) は流動性を帯びている。また, 実験室にて表層 1cm 底質の湿潤密度, 含水率 ($105^\circ C$, 24 時間), 強熱減量 ($600^\circ C$, 3 時間) を測定した。

3. 測定結果と考察

3.1 地形測量

RTK=GPS 測量と音響測深器による深淺測量から求めた毎月の標高データを各測線ごとで重ね合わせ, 海岸基準点からの距離 $L(m)$ と標高 (T.P.m) の 2 次元グラフで図-3 から図-6 に示す。図から分かるように測線 1 から測線 3 までは海岸部から沖に向かい, ほぼ 0.1% 程度の一定勾配で海底が傾斜している。測線 4 は海岸の基準点から沖合 1Km までは 0.2% で, それより沖合は 0.1% 程度と他の三つの測線と同様の傾向である。測定期間で見ると 4 月から 8 月までは地盤標高が漸減しているが, 10 月, 11 月は地盤標高が上がり, 堆積していることが分かる。この結果を平均標高の季節変動で測線 1 について示したものを図-9 に示す。この図からはより明確に春から夏場にかけては海底が浸食され, 秋にかけて堆積していることが分かる。

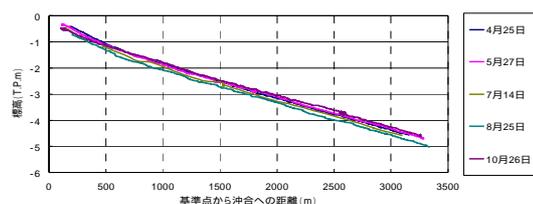


図-3 測線 1 の海底地形

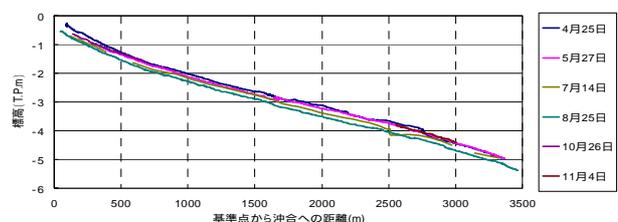


図-4 測線 2 の海底地形

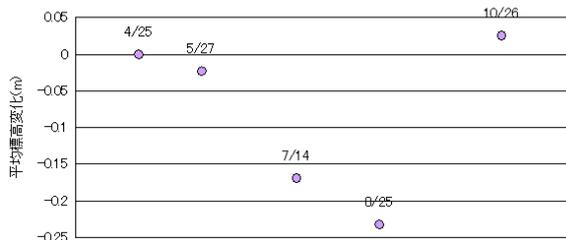


図-5 測線1の平均標高の季節変動

3.2 係留観測

懸濁物質フラックスの測定結果を係留位置と計測期間についてまとめた。図-6は係留点1 (Sx1) における ADCP の反射音響強度と SS 濃度の関係を表したものである。図中に示しているように反射音響強度と SS 濃度は比例している。相関係数は 0.993 である。SS 濃度は、潮汐による変動だけでなく水文・気象条件によっても変動するため、観測地域の 4 月 1 日から 11 月 30 日までの降水量、風向・風速、潮位を 1 ヶ月ごとに各機関のホームページから取得した。

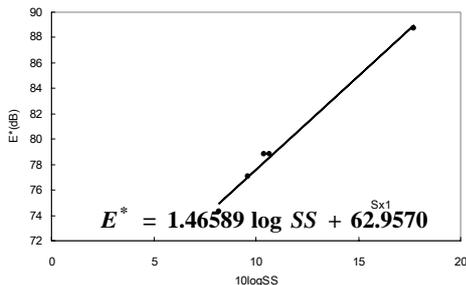


図-6 Sx1 地点における ADCP の反射音響強度と SS 濃度

式(3)～式(6)を用いて算出された SS フラックスおよび累積 SS 負荷量の岸沖方向・沿岸方向の時間変化を図-9に示す。岸から沖方向の場合は負荷量が振動しながら徐々に増加している。しかし、沿岸方向では 7 月末までは増加しているがその後、9 月 20 日までは変化が小さく、台風で大幅に減少した後は単調増加となっている。

表-1 は海岸から Sx1 の区間における累積 SS 負荷量と、Sx1 から Sx2 の区間における累積 SS 負荷量の各観測期間中の推定堆積量を表している。表から分かるように海岸から Sx1 地点までの区間はいずれの期間でも堆積している。Sx1 から Sx2 地点までは堆積と浸食が期間により発生している。6/26～7/14 の期間は浸食量が 19.0t/m と大きな値となっている。こ

れは梅雨時の波浪の影響が大きいためであると考えられる。

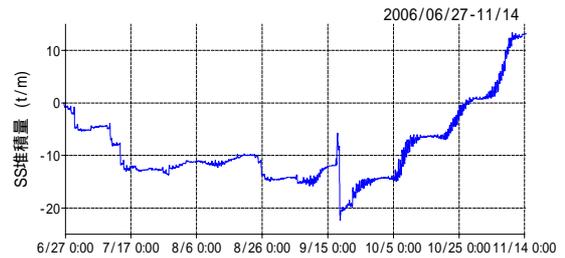


図-7 Sx1-Sx2 間の SS 堆積量の季節変動

表-1 各期間における ADCP・濁度計の計測結果から求められた測線方向の SS の堆積量

区間	海岸～Sx1*	Sx1～Sx2*
6/26～7/14	16.5t/m	-19.0 t/m
7/14～8/25	4.7 t/m	1.6 t/m
8/25～10/26	15.8t/m.	16.1t/m
6/26～10/26	37.0 t/m	-1.3 t/m

3.3 泥質の湿潤密度と粘度計測

地点 TA～S3 における粘度の鉛直分布の時間変化を図-8に示した。粘度が高く、コンターの間隔がほぼ一定の部分の短期的に安定な圧密泥とすると TC, A, B, S3 では 9/23 に圧密泥上に堆積している軟泥が突然増加しており、TA, TB では逆に減少している。調査期間中、佐賀県では台風 200610 号 (8/17～8/19) と台風 200616 号 (9/17～9/18) の 2 回、台風が通過した。その影響で TA, TB では底泥が侵食され、TC では堆積したと考えられる。TA'でも表層軟泥の侵食が見られた。

堆積したばかりの底泥は粘度が低い。そこで、定線調査において粘度が 15Pa・s 以下の底泥の厚さを求め、その時間的変化を図-9に示した。7 月、8 月には粘度が 15Pa・s 以下の泥の堆積はあまり見られないが、台風が 2 回訪れた後では干潟部である TA, TB を除いて軟泥が多く堆積したことが分かる。これは台風により干潟部の底泥が侵食され沖合に輸送されたためであると思われる。9/23 の TC 地点においてはサルボウ死貝の上に泥が約 8cm 堆積し、泥に挟まれていたのが確認できた。なお TC 地点は 7/30 現在では 154 個体/m² のサルボウの生息が確認されていた。10 月になると TC, A 地

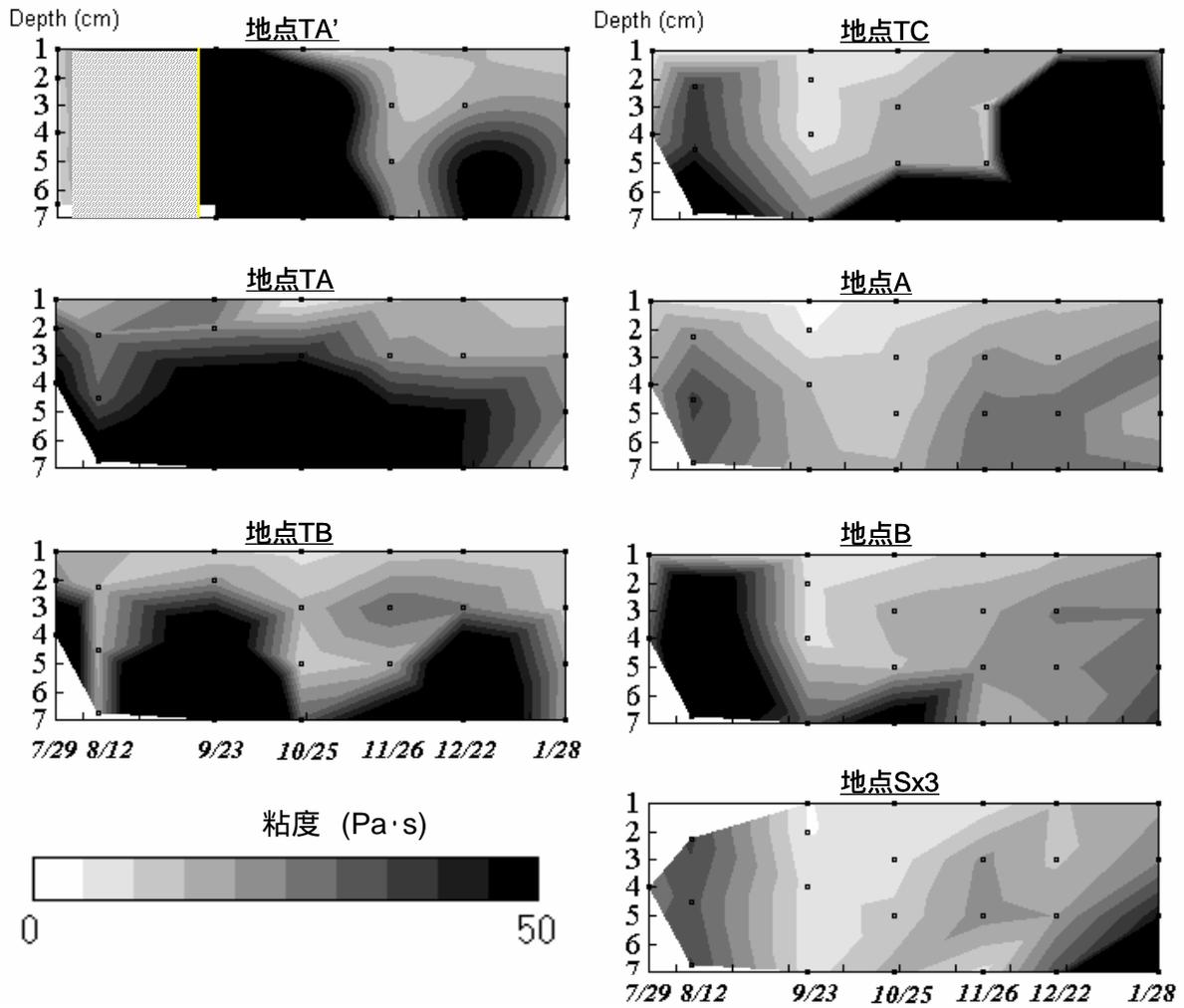


図-8 塩田川沖定線での粘度(Pa·s)の時間変化, 岸から沖方向へ TA' (標高-0.5m, □: 欠測), TA(標高-1 m), TB (標高-2.8m), TC(標高-4m), A(標高-6.5m), B(標高-10.5m), S3(標高-13m)

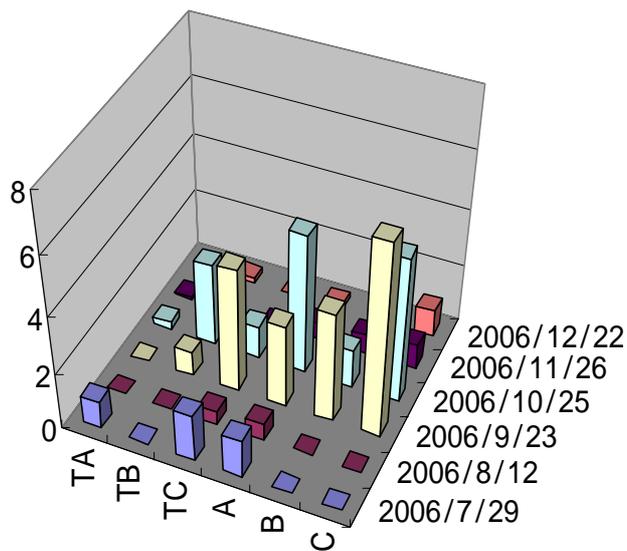


図-9 塩田川沖定線での粘度 15Pa·s 以下の底泥の堆積厚変化, 単位 : cm

点の軟泥が若干薄くなり、TB 地点に軟泥が堆積し始めた。11 月には TB 地点の堆積厚は減少しはじめてさらに岸寄りの TA、TA' 地点に軟泥が堆積し始めた。B、S3 地点では深部圧密泥の深さはほとんど変化がなく、圧密が進んだようにみえる。11 月、12 月になると TA' 地点を除いて軟泥の堆積はほとんど見られなくなった。これは、圧密により粘度が上昇したためと思われる。以上より平成 18 年 8 月～9 月の台風をきっかけに大量の軟泥が干潟から再懸濁して輸送され沖合に堆積したが、潮汐の作用により徐々に干潟に底泥が輸送されている可能性がある。

4. まとめ

海底地形測量の結果、4 月 25 日から 5 月 27 日においては大きな地形変動は見られなかったが、5 月 27 日から 8 月 25 日においては大幅に侵食されていることが分かった。また、8 月 25 日から 10 月 26 日においては堆積傾向となっている。地形測量の結果によると夏季においては侵食傾向にあり、秋季からは堆積傾向にあった。

超音波流速計の連続観測結果では夏季において懸濁物質は沖合に輸送されており、台風によって強い塩分の成層が消失した秋季からは潮汐の作用により懸濁物質が岸向きに輸送されていることから、干潟部の地形変動について夏季には降雨や台風の影響もあり侵食傾向であるが、秋季からは潮汐の作用によって堆積傾向となり海底地形測量の結果と整合する。

台風時には高波浪の影響により乱れ流速が増大し、巻き上げ作用も強くなるため懸濁物質濃度・底層濁度が高く、また、下げ潮時の流速が大きかったため下げ潮時に土砂輸送量が増大した。

広域的な底質の湿潤密度や粘度を測定した結果、台風により干潟から大量の底泥が再懸濁して沖合に堆積したことが明らかになった。このような干潟から沖合へ底質の突発的な輸送・堆積は直上水の貧酸素水塊とともに二枚貝類の生息環境を悪化させる要因になっている可能性がある。

参考文献

- 1) 宇野誠高・横山勝英・森下和志・高島創太郎・大角武志：熊本県白川河口域における土砂動態，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 561-565，2002。
- 2) 横山勝英・河野史郎・山本浩一：有明海湾奥部の地形・低質分布に関する現地調査，海岸工学論

文集，第 52 巻，pp. 936-940，2005。

- 3) 末次忠司・日下部隆昭・横山勝英・山本浩一：陸域・河口域における土砂・栄養塩の動態に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，第 236 号，pp. 19-22

(2007.3.19 受付)

筑後川感潮河道における洪水時の底質浸食 及び濁質輸送に関する研究

EROSION AND TRANSPORT PROCESS OF COHESIVE SEDIMENT
IN THE CHIKUGOGAWA ESTUARINE CHANNEL

横山勝英¹・山本浩一²・金子 祐³

Katsuhide YOKOYAMA, Kouichi YAMAMOTO and Yu KANEKO

¹博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³東京都立大学学生 土木工学科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

The erosion and transport process of cohesive sediment in the Chikugogawa estuarine channel was studied using thermometers. Sixteen self-logging thermometers were attached to a fishing rod at intervals of 0.1m; 15 of them were sunk in a muddy bed and one was placed in river water. The progress of bed erosion was estimated from the difference in the water and mud temperatures. The bottom shear stress was calculated by ADCP's velocity profile; bed erosion occurs when the shear stress exceeds 1.8 N/m². The suspended load discharged from basin was 198,000t and the load pass through 10km cross section was 843,000t. This result show that the suspended sediment discharged into Ariake Sea was composed of products in the river basin and bed sediment in the estuarine channel; the quantity of latter was several times larger than that of former.

Key Words: Erosion process, cohesive sediment, mud temperature, shear stress, sediment circulation

1. はじめに

筑後川は有明海湾奥部に流入する最大の河川であるため、干潟・沿岸域への淡水・土砂・栄養塩などの物質供給において重要な役割を果たし、また長い感潮区間が物質輸送におけるバッファゾーンになっていると考えられる。特に、シルト・粘土質の土砂は海域での濁りの原因となり、栄養塩の輸送媒体でもあるため、有明海の環境問題を検討する上では河川や感潮域での土砂動態を明らかにすることが必須であると言えよう。

昨年度の研究では¹⁾、筑後川の感潮河道にシルト・粘土が1～2mの厚さで堆積しており、これらが洪水時にフラッシュされ、洪水後に地形・底質が復元されることが明らかになった。したがって、洪水時には流域で生産された土砂だけではなく、感潮河道の堆積土砂も海域に供給されていることになり、洪水時の地形・底質変動と土砂移動を詳細に解明する必要がある。

そこで今年度は、洪水時の浸食過程について検討を進めた。一般に河床変動は音響測深器、砂面計、鉄リング、

着色煉瓦などを用いて計測されるが、前者2つの方法は設置場所や計測上の制約が多く、後者2つの方法は最大洗掘深しか分からないという欠点がある。本研究では、水温計を用いた浸食計測装置を考案して感潮河道の底質浸食過程を詳細に計測し、さらに河川から海域への土砂移動状況を解析した。

2. 研究方法

(1) 底泥浸食過程の計測方法

洪水時の河床変動を計測するには、流木やゴミが引っかかりにくい、計測機器自身による周辺洗掘が発生しにくいなどの特徴を有した機器が必要である。そこで本研究では、安価な小型メモリー水温計により浸食過程を計測することを試みた。一般に、河川水温は気温・日射の影響を受けて日周変動しているが、洪水時には雨水の直接流出の影響で日常の温度変化とは別の温度傾向を示すと考えられる。また、地中は温度変化が気温や水温変化よりも緩やかである。

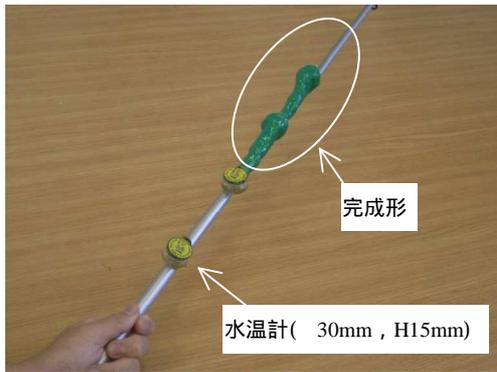


図-1 浸食計測装置

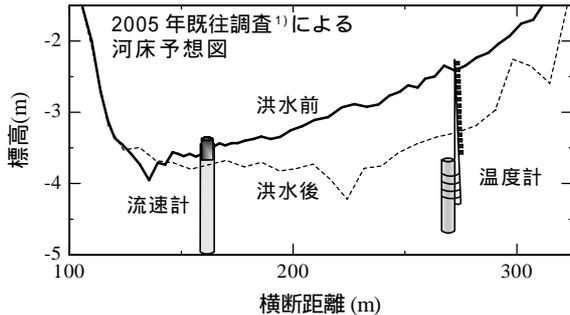


図-2 14km断面における測定機の配置図

直径30mm,高さ15mmのボタン型メモリー水温計(HOBO社Tidbit,精度0.2度)を図-1に示すようにグラスファイバー製の釣り竿に0.1m間隔で16個縛り付けた。釣り竿は細くかつ屈倒するので,洪水時の流体力に抵抗せず,洗掘やゴミ付着の問題を回避できる。また,熱伝導が悪く,地盤の温度環境を乱さない利点もある。

観測場所は筑後川感潮河道の14km地点であり,図-2に示すように測定機を設置した。昨年度の研究¹⁾により洪水後の浸食量がある程度判明しているため,浸食計測装置は浸食量が最も大きい場所に設置した。洪水前後には河床浸食量の真値を得るために,デジタル魚群探知機(Eagle社Fish Strike 2000C)により測深を行った。

また,流れの状況を計測するために超音波流速計(Nortek AS社Aquadopp;1MHz)を浸食量が少ない場所に設置した。さらに,濁度計(アレック電子Compact-CLW)を感潮域上流端(25.5km),14.6kmと10kmの3地点に設置して,懸濁土砂の移動状況を計測した。

3. 計測結果

(1) 河川流況

図-3に河川流量と水温,感潮域の水位を示す。6月23日(通算日174日)にピーク流量が1715m³/sの洪水Aが発生し,続いて6月25日(176日)に2051m³/sの洪水B,7月5日(186日)に2838m³/sの洪水C,7月20日(201日)に2773m³/sの洪水Dが発生した。50年間の平均年最大流量は3,000m³/sであるから,平均程度の洪水が発生したこと

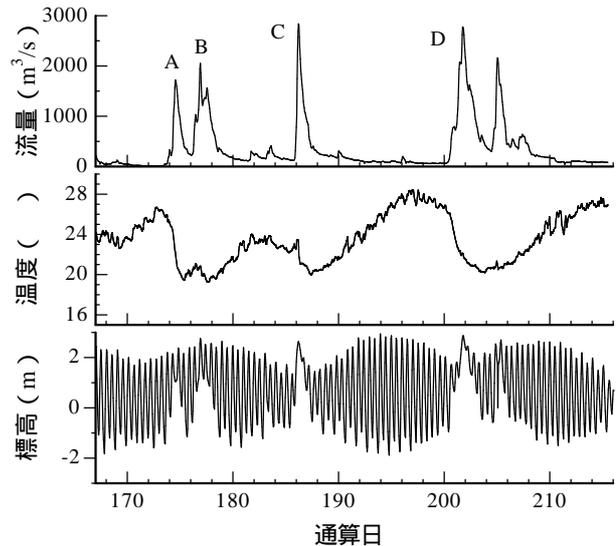


図-3 河川流量と水温,感潮域水位

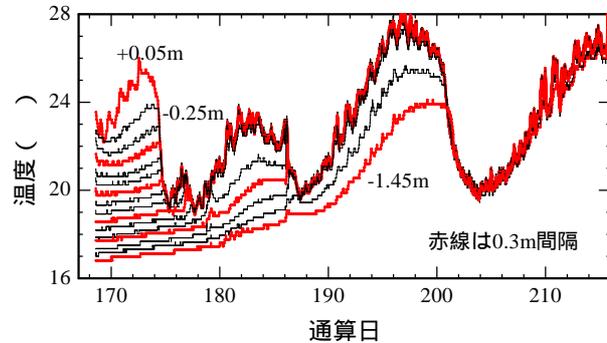


図-4 温度時系列図

になる。以後,日付は通算日で,洪水は記号で記す。

河川水温を見ると,6月は受熱期であるため平常時は温度が上昇傾向にあるが,洪水時には3~7度急低下している。本研究のアイディアは洪水時に河川水温が急変することを前提にしており,実際のデータは予想通りの変動を示した。

(2) 温度分布

図-4に河床浸食計で計測された温度時系列を示す。洪水発生前には最上部の水温変動に比べて,地中0.05mの温度は緩慢な動きを示している。地中の深度が深くなるにつれて温度は低下し,最深部の1.45mでは表層と8度の温度差があった。

洪水Aが発生した174日には最上部の温度が急激に低下し,地中の温度が順次水温に追従しているため,温度計が上部から順に水中に露出したと考えられる。拡大図(図-5)を見ると,最上部の水温は洪水の流下とともに24.5度から徐々に低下してゆき18時頃には20.5度になっている。この間,地中0.05mの温度が9時頃に泥温から水温に切り替わり,2時間後には次の0.15mの温度が水温を捉えている。17時には0.55mの温度計が水中に露出しており,およそ8時間で0.5mが浸食されたと推測される。

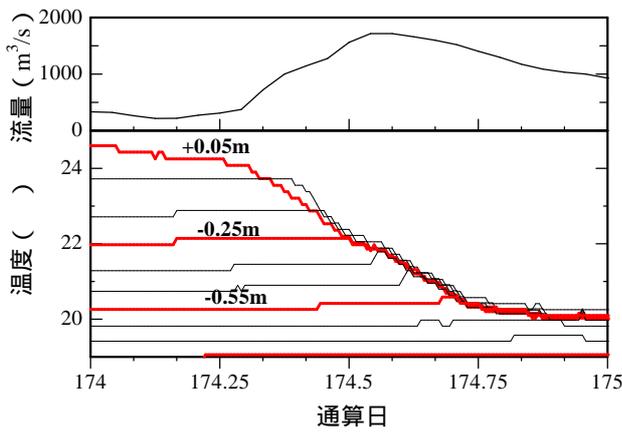


図-5 洪水Aでの温度変化

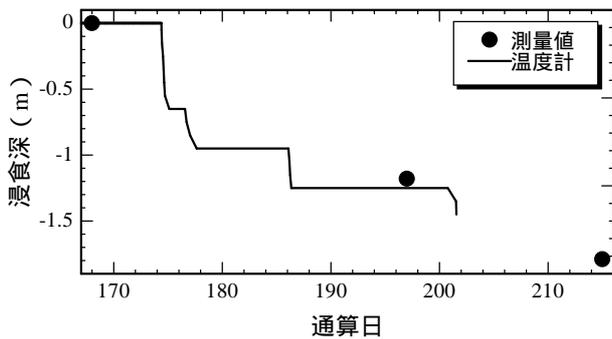


図-6 浸食計測装置による観測結果と測量値の比較

同様にして、176日の洪水Bでは温度計が0.95mまで、186日の洪水Cでは1.25mまで、201日の洪水Dでは最下部の1.45mまで露出したと考えられる。

4. 浸食過程と土砂移動状況

(1) 浸食計測の精度

図-6に温度計により推定された河床変動と測量で得られた河床高の変化を示す。197日時点の浸食位置はほぼ同じであり、水温および泥温による河床面の計測精度が高いことが示された。考案した浸食計では洪水時の浸食過程を詳細に計測できるため、測量よりも優れている。

(2) 浸食速度と底面剪断応力

浸食速度を力学的に評価するために、超音波流速計によって得られた流速鉛直分布から底面剪断応力を計算した。河床底質はシルト・粘土であるため、滑面の対数流速分布式を用いて、計測された流速分布を表現する最適な摩擦速度を最小二乗法により求めた。

図-7に底泥浸食状況と底面剪断応力の比較を示す。これより、底面剪断応力が上昇すると浸食が進行し、低下すると浸食が中断し、その閾値は概ね 1.8N/m^2 であることが分かる。洪水Dでは201.5日付近で最下部の温度計が露出したため、その先の変動が見えない。

図-8に浸食速度と底面剪断応力の相関を示す。浸食速

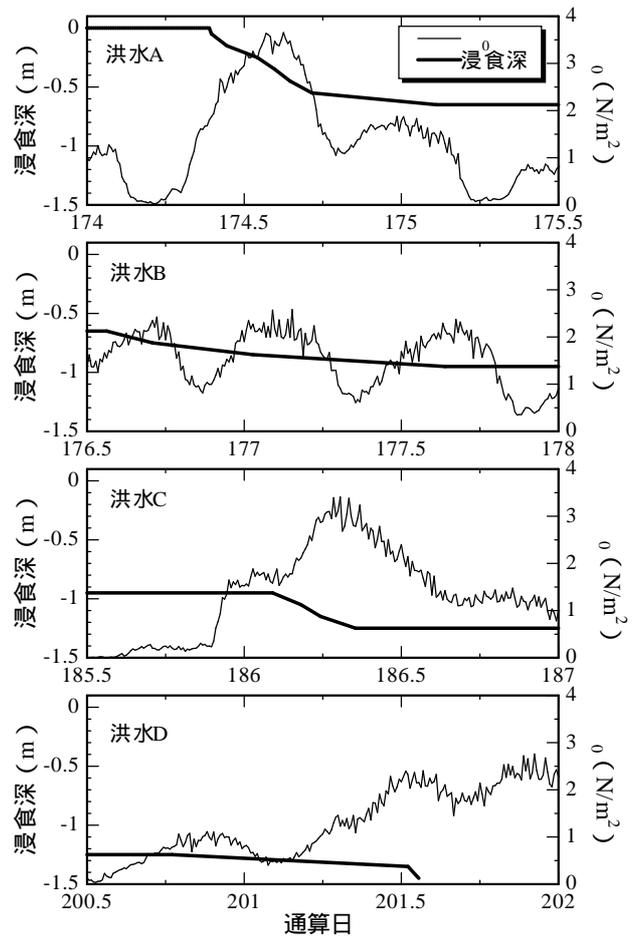


図-7 浸食の経過と底面剪断応力の変化状況

度は次式で定義される。

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{T_{n+1} - T_n} \quad (1)$$

ここで、 L は温度計の設置間隔(0.1m)、 T_n は n 番目の温度計が水中に露出した時刻である。温度計センサー部は大きさが約10mmであり、 L が0.1mであるため、浸食速度は10%程度の誤差を持つ可能性がある。

全体に右肩上がりの傾向が見られ、最下層の16番を除けば分散は小さい。洪水Dでは最下層の水温度計が露出する時間が他に比べて短い、一番下の水温度計は砂質基盤層に接近していたことが原因と考えられる。砂層と粘土層の境界では粘着性が低いので、粘土層が薄くなるとブロック的に砂層から剥離した可能性がある。

関根ら²⁾はS.Aクレー($D_{60}=0.016\text{mm}$)とT.Aカオリン($D_{60}=0.005\text{mm}$)を用いた水路実験から粘着性土の浸食速度 E_s (cm/s)を次のように提案している。

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} u_*^3 \quad (2)$$

ここで、 $(\text{cm/s})^{-2}$ は粘土の種類や水温に依存する係数であり、 $0.778 \times 10^{-5} \sim 3.89 \times 10^{-5}$ が示されている。 R_{wc} は水含有率(粘土含有率100%のとき含水比と等しい)である。

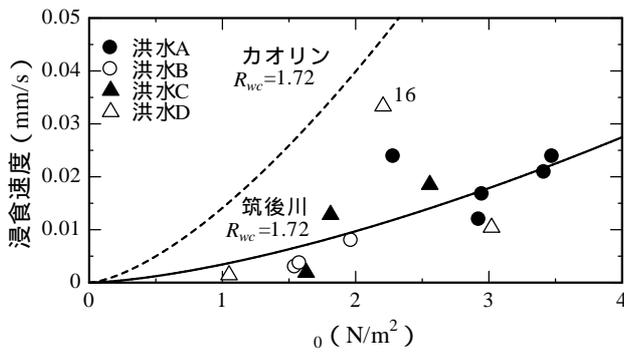


図-8 底面剪断応力と浸食速度の相関

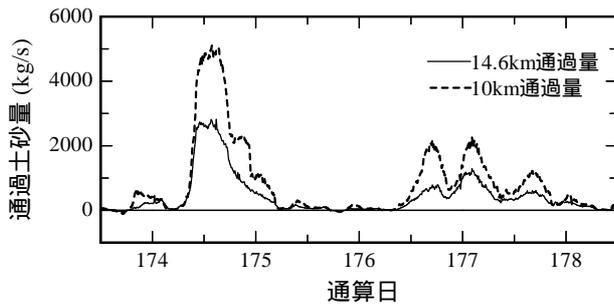


図-9 10kmと14.6kmにおけるSS通過量時系列

洪水前に採取したコアサンプルは鉛直平均含水比が17.2%、 D_{60} が0.015mmであった。そこで水含有率を1.72として最適な α を算出したところ、 $\alpha = 0.28 \times 10^{-5}$ となり図中の実線が得られた。筑後川の底泥は関根らが用いた粘土と粒径が同程度であるが、 α は1オーダー小さく、浸食されにくいことが分かった。

この差は粘土鉱物、有機物含有量、圧密期間、塩分などの違いによって生じたと考えられる。別の理由としては、流速と浸食の計測位置が異なっていたため、底面剪断応力が過大評価であった可能性がある。これらの検証は今後の課題である。

(3) 土砂移動量

感潮河道を通過する浮遊土砂量を濁度及び流速データから推定した。洪水時には濁度の断面内分布は一様であると仮定してSS通過量を計算した(図-9)。なお、流量は25.5km地点については国土交通省の流量観測値を使用し、10km地点及び14.6km地点については14kmで計測した流速鉛直分布から計算した。図-9から洪水中には10kmのSS通過量は14.6kmの1.5~2倍に増加していることが分かる。また、洪水全期間のSS通過量として図-10が得られた。下流に向かうに従って土砂量が増加しており、筑後川の感潮域では支川流入がほとんど無視できることを考慮すると、河道内でSSが生産されていることになる。

そこで、浸食計測及び洪水前後測定のデータを用いて10kmから14.6kmの区間における泥質河床の浸食量を計算すると、48.1万tonとなった。2地点の濁度計から推定されるSS増加量は39.9万tonであるから、浸食された底泥のうち約8割がSSになって移動したと考えられる。

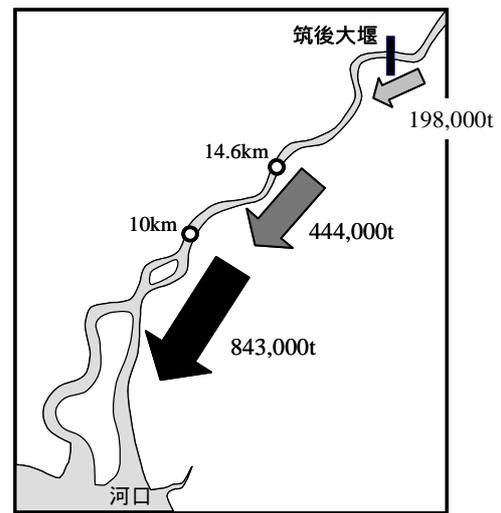


図-10 感潮区間における洪水期間のSS通過量

2006年の洪水は50年間の平均的規模であり、そのような洪水によって流域から供給されたシルト・粘土成分が19.8万tonである。一方、10kmから25.5km地点までの感潮河道で底泥から供給されたSS量は64.5万tonであり、10kmよりも下流での浸食も考慮すると、SSの河道内生産量はさらに大きな数値となる可能性がある。したがって、筑後川が洪水時に河口沿岸に排出するシルト・粘土は、流域からの供給量よりも感潮河道における内部生産量の方が数倍大きいと推察される。

(4) まとめ

以上より、筑後川におけるシルト・粘土の輸送メカニズムを推測すると次のようになる。流域において洪水時に発生したシルト・粘土は感潮域に流達する。感潮河道では底面剪断応力の増大に伴って底泥が浸食され、大半が水中に懸濁してSS化する。これらの土砂(上流からのSSと底泥から供給されたSS)は感潮河道で混和し、河口干潟へと流出してゆく。また、平水時には干潟・河口域の泥が巻き上げられて濁水を形成し、筑後川のような強混合型の感潮域では高濁度水塊が河道内に逆流・沈積して底泥を形成すると推測される¹⁾。

つまり、有明海には洪水時に流域のフレッシュなシルト・粘土と感潮河道の古いシルト・粘土の混合物が供給されると考えられる。このことは、有明海の透明度や栄養塩供給の問題を議論する上で考慮すべき点である。

参考文献

- 1) 横山勝英, 山本浩一, 一寸木朋也: 筑後川感潮河道における地形・底質の季節変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.471-475, 2006.
- 2) 関根正人, 西森研一郎, 藤尾健太, 片桐康博: 粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察, 水工学論文集, 第47巻, pp.541-546, 2003.

(2007.3.19受付)

干瀉底質環境研究部門

Research Division of ENVIRONMENTAL SCIENCE and
TECHNOLOGY of TIDAL FLAT and SEDIMENT

佐賀県沿岸域における覆砂効果について

EFFECT OF THE SAND BANKING SEDIMENT IN THE ARIAKE SEA OF SAGA OFFING

加藤 治¹・原口智和²・瀬口昌洋¹・郡山益実²

Osamu KATO, Tomokazu HARAGUCHI, Masahiro SEGUCHI and Masumi KOORIYAMA

¹農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農博 佐賀大学助手 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

The sand banking method appears to be useful for improvement of bottom sediment in the Ariake Sea. The present study investigates the change of the bottom sediment in sand banking area constructed by Saga Prefecture from 2001 to 2003. A certain area was effective. However, it was ineffective in other places.

Key Words : Ariake clay, improvement of bottom sediment, the sand banking, particle size analysis

1. まえがき

有明海は筑後川をはじめとする流入河川群から大量の浮泥が搬入される。これらの浮泥が、いわゆる環流によって湾奥部全域に堆積し、広大な干潟が形成される。この干潟域には、陸と海から多くの栄養物質が集積し、良好な漁場として活用されてきた。しかし、近年種々の環境問題が深刻化し、2枚貝の漁獲高は年々減り続けている。この原因として、(1)湾奥部を中心に底質の泥化(底質環境の変化)が進んでいること(2)稚貝の着底域が限られ、浮遊幼生の移動・集積に関する流況の変化、(3)貧酸素の環境ストレス、(4)ナルビエイによる食害等が考えられる。このため、有明海沿岸域は、底質環境を改善する方策として、覆砂、耕耘、作零、堆積物除去等が施工されてきた。

本研究は、昨年度に引き続き、佐賀県が平成13年から平成15年にアサリの養殖場の改良を目的として実施した覆砂地点における粒度組成を測定し、覆砂の持続性の検証をおこなったものである。

方法は、潮流解析による覆砂地点の底質巻き上げの可能性の検討、採土による粒度分布から覆砂材の残留状況の検討および昨年度の粒径分布との比較から覆砂効果の持続性の検討を行った。

2. 佐賀県の覆砂事業 (H13~H15)

沿岸各県は漁場の底質を改善するために、覆砂、耕

耘、作零、堆積物除去等の対策を実施してきた。このうち覆砂については、(1)栄養塩などの溶出を防ぐ、(2)汚染底質の巻き上げを防ぐ、(3)溶存酸素の消費量の削減、(4)作物相の回復、などの効果が見込まれているが、それらの効果をいかに長く維持させるかが大きな課題である。

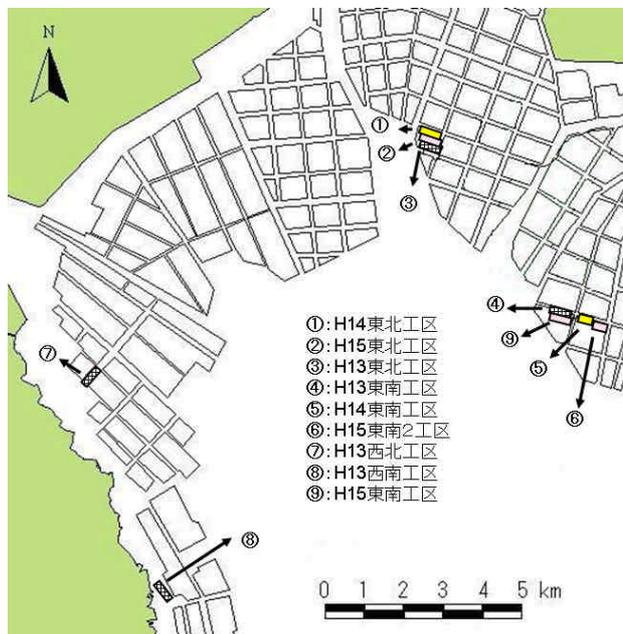


Fig.1 佐賀県が実施した覆砂地点 (H13~H15)

佐賀県が平成13年から15年に実施した覆砂地点をFig.1に示す。一区画の規模は、100m×400m×0.28mで、覆砂面積40,000m²、海砂量12,320m³である、H14東南工区は

360m×100m（面積：36,000m²、土量：10,080m³）、H15東南工区は390m×100m（面積：39,000m²、土量：10,920m³）、H15東南2工区は40m×100m（面積：4,000m²、土量：1,120m³）で施工されている。図において、地点名につけているHは施工年度を表す。各地点は、西北工区は肥前七浦沖、は太良町沖、、、は住之江港沖・六角川湾筋沿い、、、は筑後川の湾筋沿いの地点である。

3. 湾奥部の潮流解析

覆砂が施工された地点を中心に湾奥部における大潮時の潮流解析を行った。覆砂地点の水深が小さいので、次の水平二次元の連続の式(1)と運動方程式(2)を用いて、シミュレーションを行った。差分間隔は、Fig.2に示すように、 $x = y = 300\text{m}$ とした⁶⁾。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{q_x}{h+h} \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{q_y}{h+h} \frac{\partial q_x}{\partial y} \\ = -g(h+h) \frac{\partial h}{\partial x} - f \frac{q_x q}{(h+h)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{q_x}{h+h} \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{q_y}{h+h} \frac{\partial q_y}{\partial y} \\ = -g(h+h) \frac{\partial h}{\partial y} - f \frac{q_y q}{(h+h)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 q_x, q_y : x, y軸方向の単位幅あたり流量

h : 水位、 h : 平均水深、 $q = (q_x^2 + q_y^2)^{1/2}$ 、

$f = n^2 g / (h+h)^{1/3}$ 、 n : 粗度係数

である。境界条件は、試料を採土した2006年4月8～9日の大潮時の潮汐を調和分解で求めて与えた。計算結果で、満潮後3時をFig.3に、干潮後3時をFig.4に

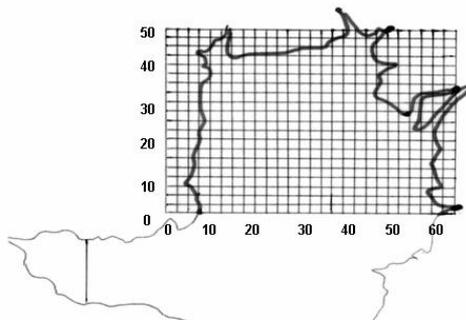


Fig.2 計算メッシュ

示す。

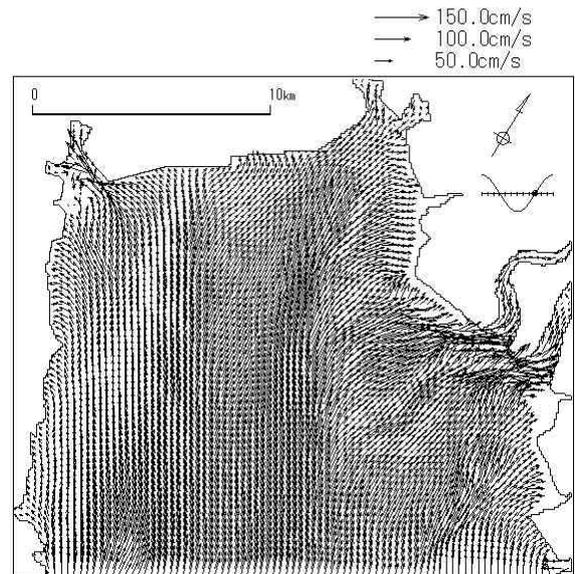


Fig.3 満潮後3時の流速ベクトル図

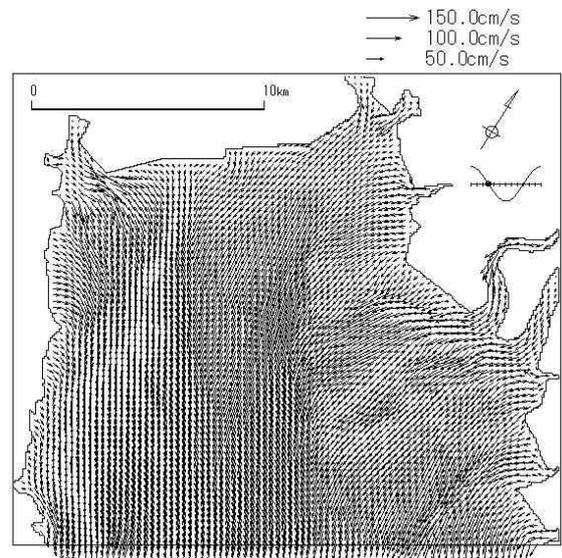


Fig.4 干潮後3時の流速ベクトル図

図から、上げ潮時に筑後川・早津江川河口域では1m/s以上の流速となっていることがわかる。また、海底部の南北に延びた嶺ノ州、野崎ノ州のような大きな海底砂州部分では、溝状の海底水道となっており、その部分で流れが速くなっていることがわかる。

覆砂地点における大潮時の干潮-満潮-干潮の一潮汐間流速変化をFig.5に示す。図から明らかなように、一潮汐間の最大流速は、、地点で45.6cm/s、、、、地点で50.0cm/s、地点で、29.4cm/s、地点で44.3cm/sとなっている。

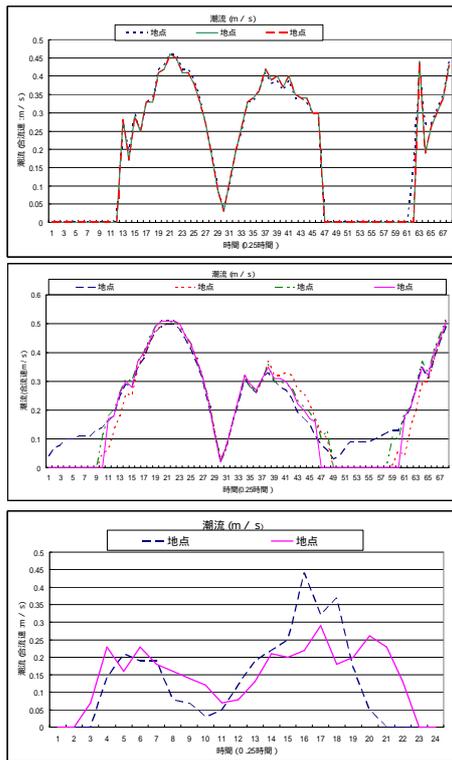


Fig.5 覆砂地点の流速分布

4. 覆砂材の粒径分布

佐賀県では、覆砂材として熊本県天草郡有明町大浦沖の底質を利用している。平成13～15年における覆砂材の粒径加積曲線をFig.6に示す。

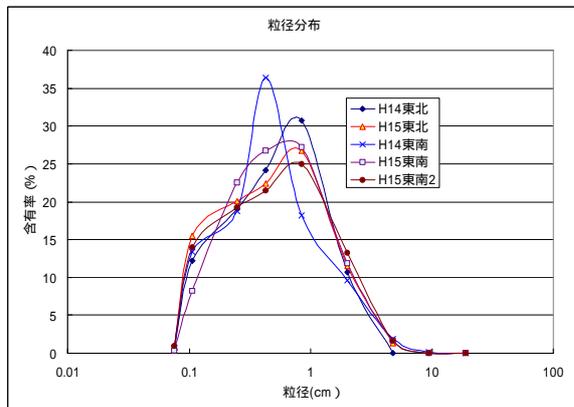


Fig.6 覆砂材の粒度分布

この図から、平成14東南工区は0.425mm粒径が他より10～15%程度多いのと平成15東南工区は0.1mm粒径が他より約半分程度となっている以外は、ほとんど粒径分布に違いはない。

覆砂した面積をTable.1に示す。

Table.1 覆砂面積

	平成13年	平成14年	平成15年
覆砂面積(ha)	16	7.6	8.3

5. 有明粘土の含水比と限界巻き上げ流速

加藤らが円形水槽でおこなった実験から、有明粘土の含水比と限界巻き上げ流速との関係をFig.7に示す。

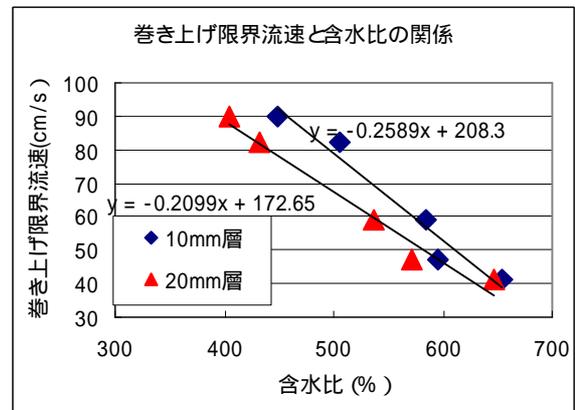


Fig.7 有明粘土の含水比と限界巻き上げ流速

含水比としては、底層表面の含水比で代表させるのが合理的である。しかし、表層の含水比を求めることは非常に難しい。そこで、表層から10mmあるいは20mm層での含水比と限界流速との関係を求めたものが、Fig.7である。つまり今回の実験では、現地での表層0～5mmの含水比が限界流速に対応した含水比以下であれば、巻き上げは起こらないと考える。

今回の実験は、流れのみの場合であり、波による巻き上げは考慮していない。台風等では吹送流、波浪による底面の擾乱があるので底面の巻き上げはさらに複雑である。

採土した試料の表層部(0～5mm)での含水比は、H13西北工区対照区(地点)で275.7%であった以外は全て100%以下であった。前述のように、各覆砂地点での大潮時の最大流速は50cm/s以下であるため、Fig.7より全ての覆砂地点では日常の潮汐現象では底泥の巻き上げは起こらないということが明らかとなった。

6. 各覆砂地点の粒径区分の変化

各覆砂地点での覆砂後の底質状況を把握するために、覆砂したところで2箇所(覆砂地点とよぶ)とその近傍の覆砂がなされていない地点1箇所(対照区とよぶ)のあわせて1地区3本の柱状サンプリングによる採土を行い、その分析を行った。

6.1. 西南工区と西北工区

有明海の湾奥部では反時計回りの還流がある。有明海東岸域に流れ込む筑後川等の河川群によって運搬されてきた浮泥のうち粒径の比較的大きいものは東岸域に、粒径の細かいものはこの還流によって西岸域に運ばれ堆積

する。従って、湾奥部西岸域の底質は有明海の中でも最も粒径の細かい粘土・シルト質で構成されている。西南工区・西北工区はこのような状況のもとで覆砂が平成13年に施工された。

(1) 西南工区

Fig.8に西南工区における覆砂地点と対照区での表層(0~5cm)の粒径分布を示す。

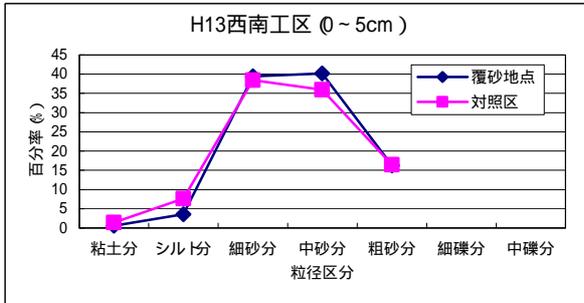


Fig.8 H13西南工区粒径分布

覆砂地点では、砂分があり、シルト・粘土分が少ないことから、ある程度覆砂の効果が持続していることがわかる。また、対照区については、Fig.9より、表層から5cm以下では、シルト・粘土分が26.2~57.7%となっていることから、表層に砂分の多いものが堆積したものと考えられる。

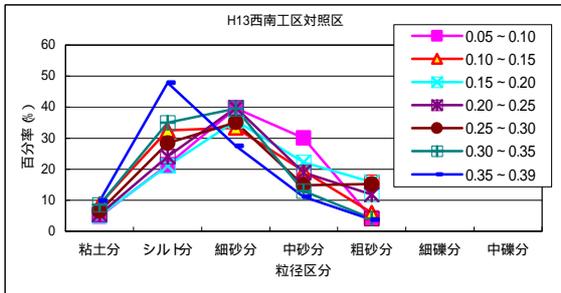


Fig.9 H13西南工区の深度別粒径区分

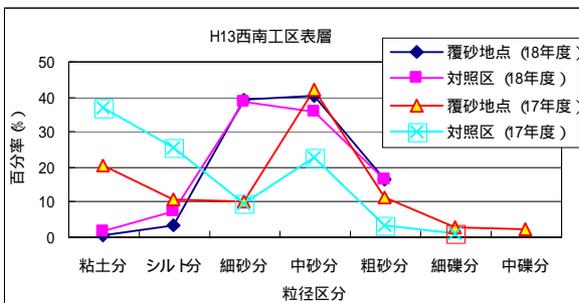


Fig.10 H13西南工区覆砂表層の平成17年と18年の比較

Fig.10は、平成17年度と18年度に行った表層の粒度分析の比較を示す。シルト・粘土分の含有量が大幅に減少しており、また粗砂分が増加しているのがわかる。平成

17年から平成18年にかけて、表層に砂分が多いものが堆積したものと考えられる。しかし、有明海の還流により浮泥が運搬されるところで、粒径の大きなものが堆積したことは、なんらかの外的要因によるものと考えられる。この要因の一つとして台風の影響が考えられる。

(2) 西北工区

Fig.11に西北工区における覆砂地点と対照区での表層(0~5cm)の粒径区分および粒径区別の割合を示す。

表層だけで見ると、覆砂地点では粗砂分が8.2~10.7%で、シルト・粘土分が10.4~9.3%に対して、対照区では粗砂分が0.1%で、シルト・粘土分が57.8%となっている。

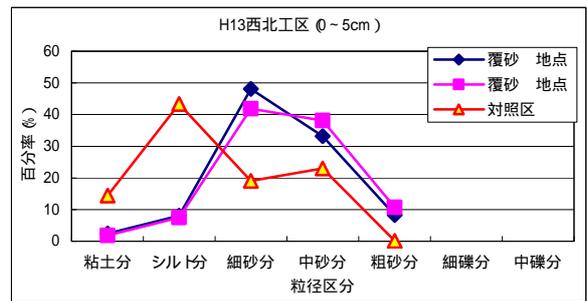


Fig.11 H13西北工区粒径区分

シルト・粘土分の割合から見ると、覆砂の効果が持続していると考えられる。

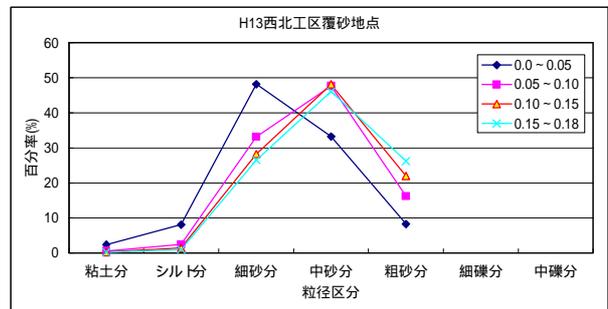


Fig.12 H13西北工区の表層を除く深度別粒径区分

Fig.12に表層を除く深度別粒径区分を示す。図より、表層5cmまではシルト・粘土分が10.4%に対して、5cmより深い部分では1.2~3.0%である。粗砂分では、8.2%に対して、16.2~26.2%となっていることから、シルト・粘土分が覆砂地点に堆積していることがわかる。この地点は還流によって浮泥が運搬されるところであるから、シルト・粘土分が覆砂地点に堆積していることがわかる。この地点でも同様に、還流によって浮泥が運搬されるところであると考えられる。

また、覆砂地点の表層では貝殻が9個あり、では19個あったことから、二枚貝類にとっては住みやすい環境だと言える。

Fig.13に西北工区の覆砂表層における平成17年度と平成18年度の粒径区分の比較を示す。

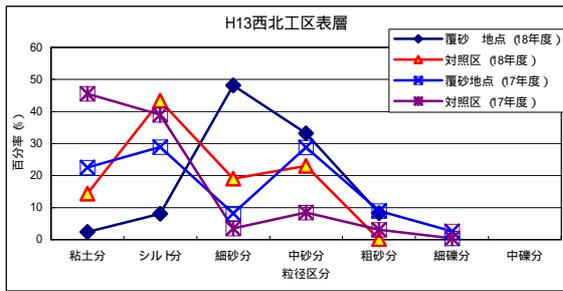


Fig. 13 H13西北工区覆砂表層の平成17年と18年の比較

図から、シルト・粘土分の含有量が平成17年度の51.4%から平成18年度には19.7%と大幅に減少しているが、中砂分では28.8%から33.2%とそれほど変化していないことがわかる。

6.2. 東北工区

東北工区は住之江港沖約6.8kmの六角川湾筋で施工された。この地域では平成13年から3年間にわたって覆砂が施工されている。

(1) 平成13年度施工

Fig. 14にH13東北工区における覆砂地点と対照区での表層(0~5cm)の粒径区分および粒径区分別の割合を示す。

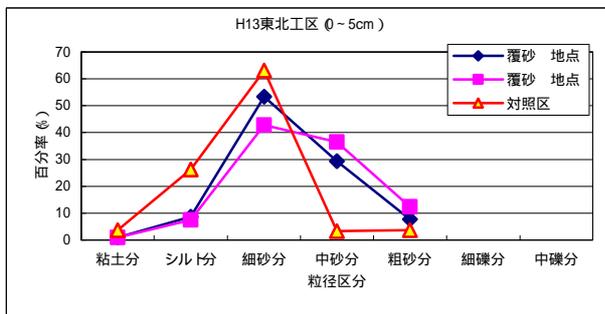


Fig. 14 H13東北工区覆砂地点粒径区分

この図から、表層では、覆砂地点で粗砂分が7.7~12.3%でシルト・粘土分が9.6~8.3%に対して、対照

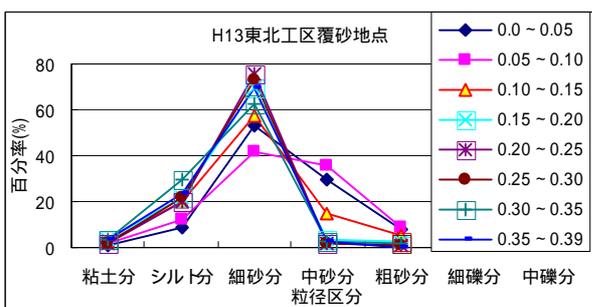


Fig. 15 H13東北工区覆砂地点の深度別粒径区分

区では粗砂分が3.6%でシルト・粘土分が29.9%となっている。シルト・粘土分の割合から見ると、ある程度覆砂の効果が続いていると考えられる。

また、覆砂の表層には貝殻が14個あったことから二枚貝類にとって生息しやすい環境だと言える。

Fig. 15に、覆砂地点の深度別の粒径区分を示す。深くなるにつれて粗砂分が減少し、シルト・粘土分が増加している。このことから、覆砂の効果が続いているものと考えられる。

(2) 平成14年度施工

Fig. 16にH14東北工区における覆砂地点と対照区での表層(0~5cm)の粒径区分を示す。

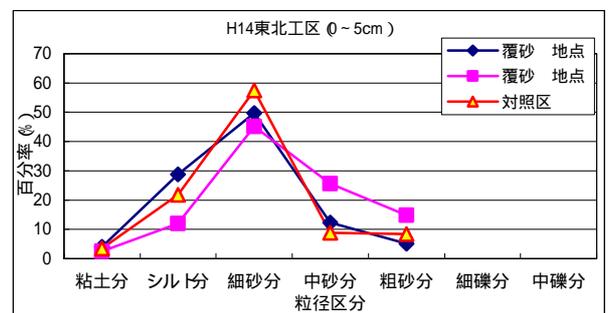


Fig. 16 H14東北工区覆砂地点粒径分布

図より、覆砂地点と対照区の表層を比較すると、異なる粒径を示している。これは、覆砂地点に貝片を多く含んでいたために、粒径区分の判断が難しかったためだと考えられる。

貝殻の個数は、覆砂地点には23個、覆砂地点でも23個と大変多くあったことから、この地点は二枚貝類にとっては良い生息環境であると言える。

(3) 平成15年度施工

Fig. 17にH15東北工区における覆砂地点と対照区での表層(0~5cm)の粒径区分および粒径区分別の割合を示す。

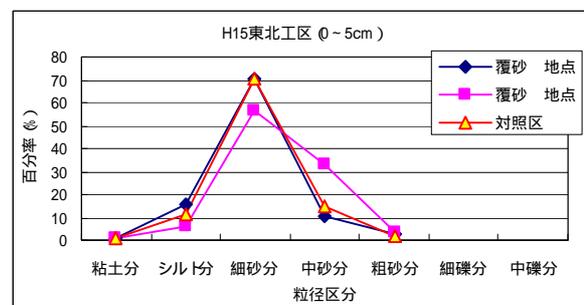


Fig. 17 H15東北工区覆砂地点粒径区分

図から、覆砂地点では、粗砂分が少ないがシルト・

粘土分の割合から見ると、覆砂の効果が続いていると考えられる。しかし、覆砂地点と対照区の分布形が大変良く似ている。つまり、覆砂地点では覆砂の効果が消滅したと考えられ、しかもシルト分が覆砂した地点の方が多いため底質が悪化しているとも言える。Fig. 18、Fig. 19は、H15東北工区の覆砂地点および対照区の深度別粒径区分である。

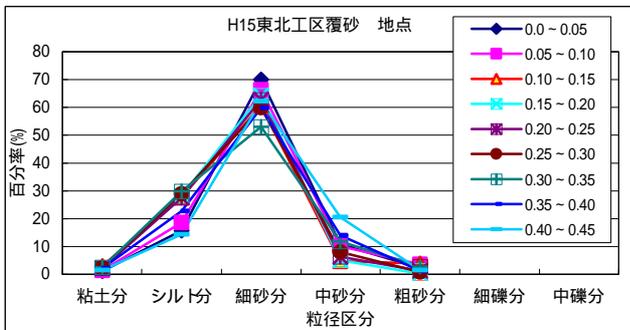


Fig. 18 H15東北工区覆砂地点の深度別粒径区分

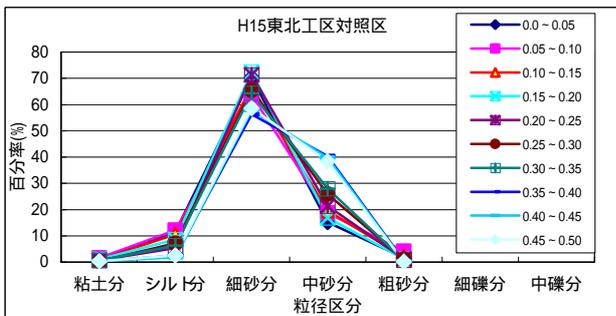


Fig. 19 H15東北工区対照区深度別粒径区分

2つの図を比較すると、両者は表層と同様に良く似た分布形をしているが、シルト・粘土分では対照区よりも覆砂地点の方が多く含んでいる。また中砂分は覆砂地点より対照区の方が多く含んでいる。これより、表層のみではなく全体的に覆砂効果が薄れていると言える。原因は、シルト・粘土の堆積によるものと考えられる。

Fig. 20は、平成17年度と18年度に行った粒度分析との表層の比較を示している。シルト・粘土分の含有量が全体的に減少しているのがわかる。

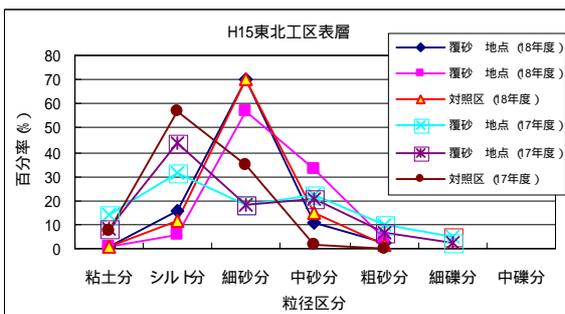


Fig. 20 H15東北工区覆砂表層の平成17年と18年の比較

このことは、底層のシルト・粘土質が掃流されたのではないかと考えられる。

6.3 東南工区

東南工区は、川副町佐賀空港沖約8.2kmの筑後川湾筋で施工されている。平成13年～平成15年の間に11.9haの面積で覆砂が施工された。

(1) 平成13年度施工

Fig. 21にH13東南工区における覆砂地点と対照区での表層(0~5cm)の粒径区分および粒径区分別の割合を示す。

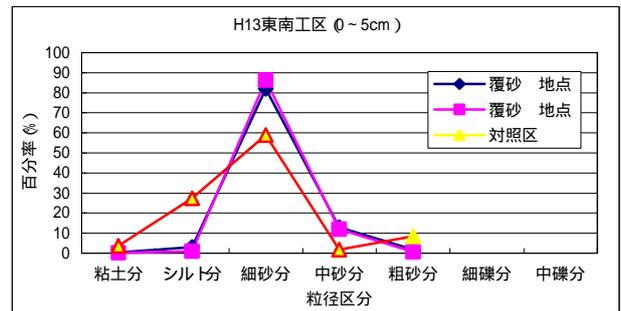


Fig. 21 H13東南工区覆砂地点粒径区分

図から粗砂分では覆砂地点より、対照区の方が多いが、シルト・粘土分では対照区よりも覆砂地点の方が大幅に少ない。表層に関しては、シルト・粘土分の割合から見ると、覆砂の効果が続いていると考えられる。

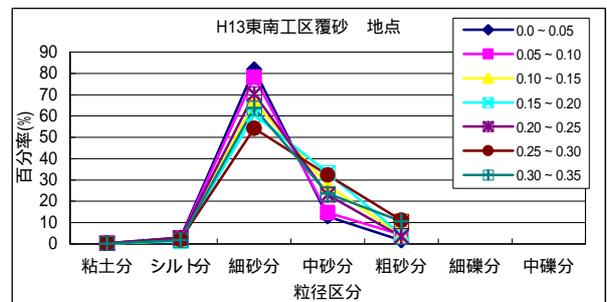


Fig. 22 H13東南工区覆砂地点の深度別粒径区分

Fig. 22は、H13東南工区の覆砂地点の深度別の粒径区分である。全ての深さについて、シルト・粘土分が少くない。

Fig. 23は、H13東南工区の対照区の深度別の粒径区分である。シルト・粘土分は19.0~47.1%の含有量である。図において、シルト・粘土分の割合から見ると覆砂効果が持続しているものと考えられる。しかし、施工した覆砂の高さが0.28mより深い部分でもシルト・粘土分が少なくなっている。これは、下層のシルト・粘土分が反転し、流されたと考えられるが、今後の検証が必要である。

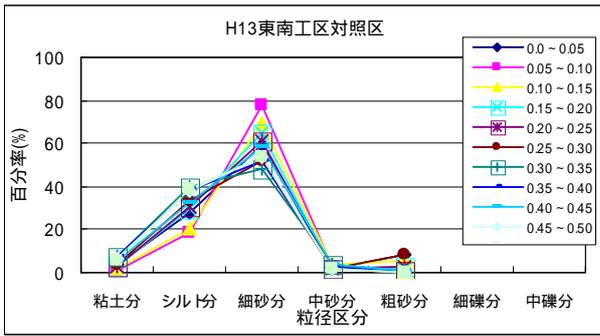


Fig. 23 H13東南工区対照区の深度別粒径区分

Fig. 24に平成17年度と平成18年度におこなった粒度分析の結果を示す。

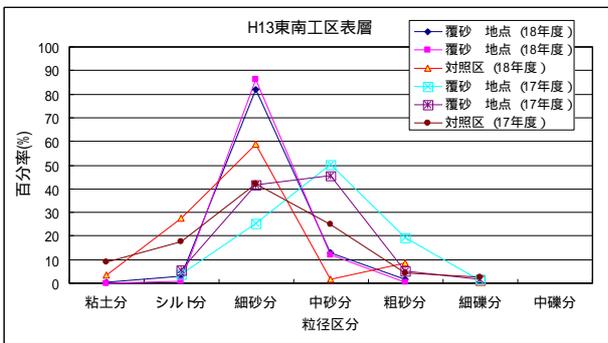


Fig. 24 H13東南工区覆砂表層の平成17年度と18年度の比較

図から17年では中砂分の割合が多いが、18年では細砂分の割合が非常に多くなっている。17年に25%以上を占めていた粘土・シルトが18年度にはほとんどなくなっている。これも台風の影響と考えることが出来る。

(2) 平成14年度施工

Fig. 25にH14東南工区における覆砂地点での表層(0~5cm)の粒径区分および粒径区分別の割合を示す。

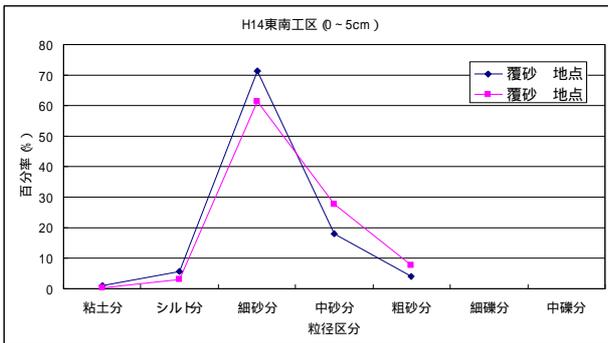


Fig. 25 H14東南工区覆砂地点粒径区分

覆砂地点では粒径区分はほとんど変わらない。対照区は採土が困難だったため、比較できない。

Fig. 26には、覆砂地点での深度別粒径区分を示している。

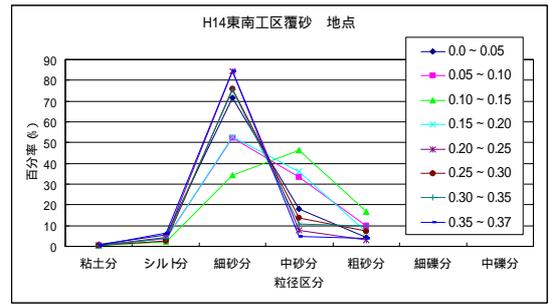


Fig. 26 H14東南工区、覆砂地点深度別粒径区分

深さ5cmから15cmの層で中砂分の割合が多くなっており、覆砂の効果が表層以外は続いていることが読み取れる。

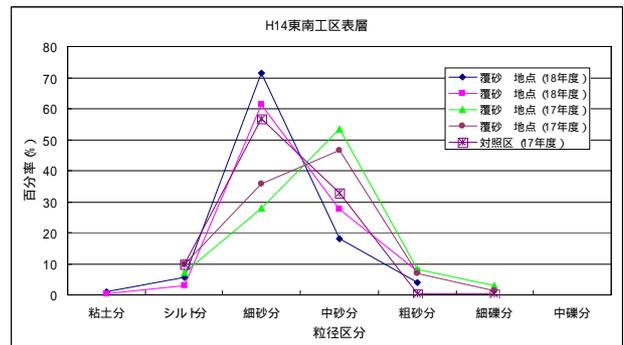


Fig. 27 H14東南工区覆砂表層の平成17年度と18年度の比較

Fig. 27には、H14東南工区覆砂表層における平成17年度と平成18年度に調査した粒度区分を示す。この図によれば、17年度では中砂の割合が多かったが平成18年度には細砂の割合が多くなっている。シルト・粘土は17年より18年の方が少ない。覆砂の効果は若干維持している模様である。

(2) 平成15年度施工

Fig. 28にH15東南工区における覆砂地点での表層(0~5cm)の粒径区分および粒径区分別の割合を示す。

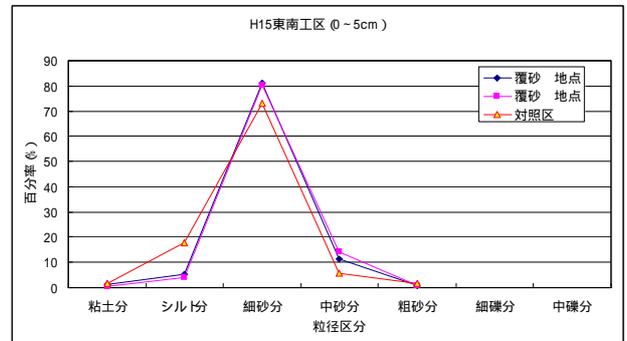


Fig. 28 H15東南工区覆砂地点粒径区分

図によれば、粗砂分に関しては、対照区の方が少し多いが、中砂分では覆砂地点の方が多。また、シルト・

粘土分に関しては、覆砂地点の方が少ない。しかし、覆砂地点と対照区の粒径分布は非常に似たものとなっていることから、もともと砂分の多い地点であることがわかる。そのように考えると、多少覆砂効果が持続していると言える。

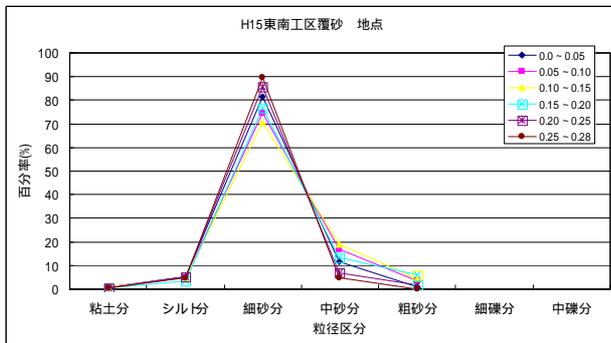


Fig. 29 H15東南工区覆砂地点深度別粒径区分

Fig. 29のグラフは、H15東南工区の覆砂 地点の深度別の粒径区分である。全ての深さについて、シルト・粘土分が少ない。また、粗砂分・中砂分も少ない。

次のFig. 30は、H15東南工区の対照区の深度別の粒径区分である。シルト・粘土分は19.7~69.4%の含有量である。この図から、シルト・粘土分の割合から見ると覆砂効果がある程度持続しているものと考えられる。

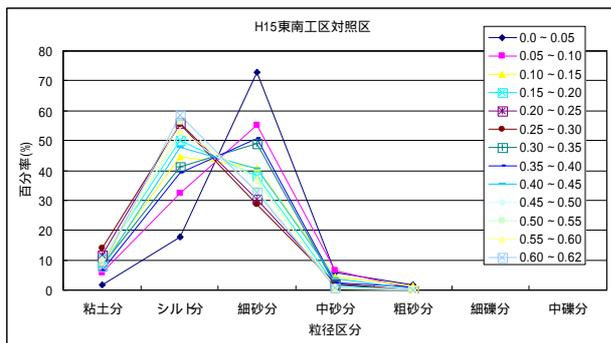


Fig. 30 H15東南工区対照区深度別粒径区分

Fig. 31は、平成17年度および平成18年度に行った粒度分析の比較を示す。

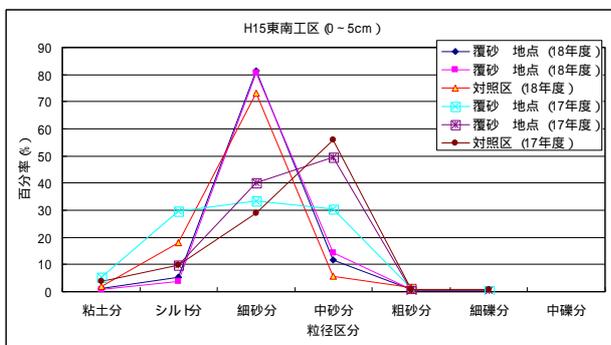


Fig. 31 H15東南工区覆砂地点表層の平成17年と18年の比較

17年度の結果から比較して、中砂分・細砂分の含有量

が変わらず、シルト・粘土分では覆砂地点の方が多く、環境悪化しているといえる。しかし、今回の結果と比較すると、全体的に中砂分が減少し、細砂分が増加している。粒径の大きい覆砂が流亡したと考えられる。

7. まとめ

本研究では、有明海で各県が取り組んでいる覆砂についてその効果の持続性を検証するために、佐賀県が実施した覆砂地点で採土し、粒度組成分布から考察を行った。含水比実験の結果と巻き上げが起こる限界流速の関係より、採取した全ての地点の試料に対して巻き上げが起こっていないと言える。

粒度分析の結果では、地点によりその効果が充分持続していると考えられるものや覆砂によって底質の悪化が懸念されるものがあった。

平成17年との比較では、中砂分、シルト分が減少し、細砂分が増加している地点が多かった。これは覆砂材の沈み込みやシルト分の流亡が考えられる。しかし、平成17年9月に起こった台風の影響も無視できない。この大型の台風により底質が巻き上げられ、粒径が変わったとも考えられる。今後は台風の通過前後での底質の変化の調査も必要である。

より緻密な覆砂の効果・影響の評価のためには、底泥有機物量の変化、底泥硫化物量の減少、底泥粒径の変化、栄養塩類の溶出量変化、DO（溶存酸素）消費量の変化、底生生物の多様化の検証、底生魚類の多様化および生物群集の多様化等の検証も必要である。

参考文献

- 1) 佐賀県沖有明海の覆砂による底質の経時変化について（佐賀大学有明総合研究プロジェクト成果報告 第2巻 2006）：加藤 治・原口 智和・瀬口 昌洋・郡山 益実
- 2) 有明海の潮流解析（浅海干潟総合実験施設研究紀要 第3号 25-34 1989）：加藤 治・戸原 義男・森 健
- 3) アサリ漁場の環境特性（大分海水研調研報 NO. 4 pp57-63 2003）：岩男 昂
- 4) アサリの漁場形成について（昭和58年度福岡県豊前水産試験場研究業務報告 34-106 1983）：藤本 敏昭・中村 光治・小林 信・林 功・滝口 克己・尾田 一成・鶴島 治市
- 5) 沿岸域における海洋環境改善技術に関する調査研究報告書（2000）：シップ・アンド・オーシャン財団

(2007.3.19受付)

有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の 発生機構について

OCCURRENCE MECHANISM OF HYPOXIC WATER IN THE WESTERN INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA

瀬口昌洋¹・郡山益実²・石谷哲寛³・加藤 治¹・原口智和²

Masahiro SEGUCHI, Masumi KORiyAMA, Tetuhiro ISHITANI,
Osamu KATO and Tomokazu HARAGUCHI

¹農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科 (〒840 - 8502 佐賀市本庄町1番地)

²農博 佐賀大学助手 農学部生物環境科学科 (〒840 - 8502 佐賀市本庄町1番地)

³農修 鹿児島大学大学院 連合農学研究科 (〒840 - 8502 佐賀市本庄町1番地)

Vertical diffusion coefficients, which were calculated from the vertical velocities measured in the interior western parts of the Ariake Sea in summer of 2006, decreased rapidly near the lower end of density pycnocline. Oxygen consumption in the bottom layer was mainly caused by aerobic decomposition of organic matter suspended in that layer. The seasonal variations of vertical diffusion coefficient and oxygen consumption rate in the study area, which is located in the interior western parts of this sea, were analyzed by the two-layer box model. As a result, vertical diffusion coefficient tended to increase in summer-autumn and to decrease in winter-spring, and its monthly variations were closely related to those of density stratification parameter. On the other hand, oxygen consumption rate tended to be positive (O_2 consumption) in spring-summer and to be negative (O_2 production) in autumn-winter.

Key words : hypoxic water, pycnocline, vertical diffusion coefficient, oxygen consumption rate, box model, Ariake Sea

1. まえがき

近年、有明海奥部ではニゴリの低下、底質の泥化・汚泥化、貧酸素水塊や赤潮の発生の激化、二枚貝類の激減など環境の悪化や生態系の劣化が深刻化している¹⁾。その中でも、特に夏季に広域的に発生する貧酸素水塊は、有明海奥部に生息する稀有な底生生物の生存を脅かす最も深刻な環境問題の1つである。このような貧酸素水塊は、基本的には表層などから底層への酸素補給量より底層での酸素消費量が多くなることにより発生する。しかし、酸素補給量の低下をもたらす密度躍層の形成過程や表層から底層への酸素補給量を左右する鉛直拡散係数の分布性さらには底層での酸素消費特性などについては、必ずしも多くの知見が集積されているとはいえない。特に近年、貧酸素水塊が頻発している有明海奥部西岸域

においては、これらに関する報告例は皆無に等しい。

本研究では、まず有明海奥部西岸域での現地観測データに基づいて、この海域における貧酸素水塊の発生状況について明らかにする。次いで、現地で測定された流速の鉛直成分から密度成層期における鉛直拡散係数を算定し、その分布性について検討すると同時に、奥部西岸域で採取した海水や底泥を用いて実験的に求めた底層の酸素消費速度と水質との関係などについて考察する。さらに29年間の佐賀県浅海定線データ²⁾から水平方向の移流効果を考慮した2成層ボックスを用いて、奥部西岸域における表層と底層間の鉛直拡散係数及び底層における酸素消費速度などの月変動傾向を求め、この海域の貧酸素水塊の発生について考察する。

2. 現地観測及び実験の概要

図-1は、有明海奥部における現地観測地点と解析対象海域（破線で囲まれた区域）を示したものである。なお、×印は佐賀県及び福岡県の浅海定線観測地点である。現地観測は微細土や有機物が広く堆積し、夏季に貧酸素水塊が頻発している奥部西岸域の2地点St.1、St.2で2006年8月24日と9月2日の計2回にわたり実施された。なお、St.1及びSt.2の含泥率は、それぞれ96%及び94%であった。

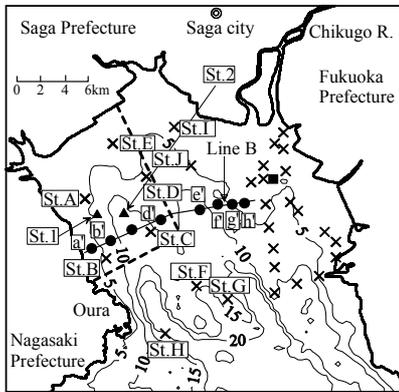


図-1 有明海奥部における観測地点及び解析対象海域（破線で囲まれた海域）

これらの観測では、両地点における水質及び流況を明らかにするために、多項目水質計（AAQ1183, アレック電子）及び電磁流速計（VP2400D, ケネック）を用いて、流速、流向、海水温、塩分、DO、濁度、クロロフィルa(Chl. a)及び光量子の鉛直分布の経時変化を測

定した。また、St.1及びSt.2における密度躍層下の底層水及び底泥の酸素消費速度を明らかにするために、北原式採水器(C号, 離合社)を用いて表層(海面より0.5m深)から底層(海底上約0.5m)までの採水(St.1:1m毎, St.2:2m毎)を行うと共に、柱状採泥器(離合社)を用いて層厚約80mmの未攪拌コアの採泥を行った。採取した試料はその日のうちに実験室に持ち帰り、すみやかに底層水及び底泥の酸素消費実験を行った。底層水及び底泥の酸素消費実験は、それぞれ沿岸環境調査マニュアルⅡ³⁾の方法と環境庁調査方法⁴⁾に準拠した。さらに、密度成層期における海域の乱れ構造を明らかにするために、2006年9月2日に測点St.1及びSt.2において、それぞれ深さ0.5m及び1.0m毎に3次元精密流速計(VECTOR, NORTEC AS)を用いた水平及び鉛直成分の測定を行った。なお、底層の酸素消費速度の支配要因と考えられる懸濁態有機物(POC)に関しては、CHNコーダー(JM-10, J-Science LAB)を用いて測定した。また、採水した海水の無機栄養塩($PO_4^{3-}-P$, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ 及び $NO_2^- -N$)濃度の分析は、オートアナライザー(SWAAT, BLTEC)を用いて行った。

3. 結果及び考察

1) 貧酸素水塊の発生状況

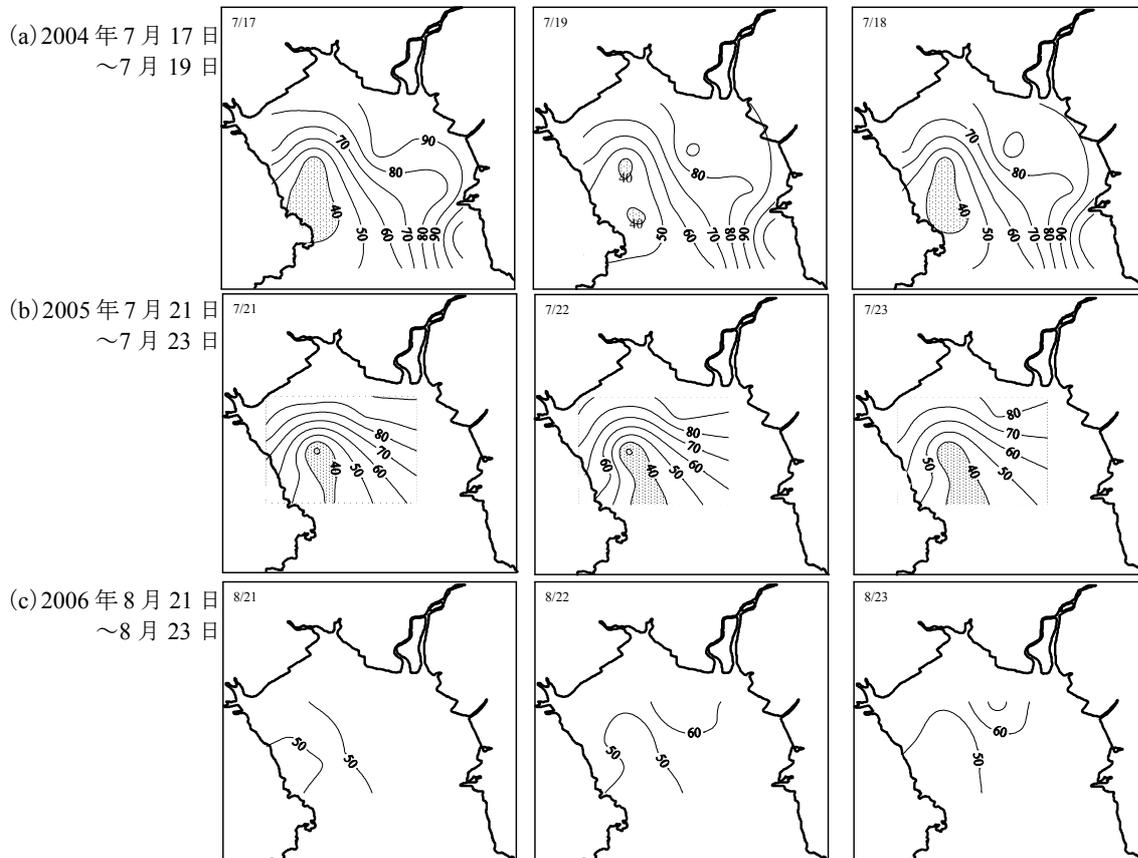


図-2 大潮期における底層付近のDOの水平分布

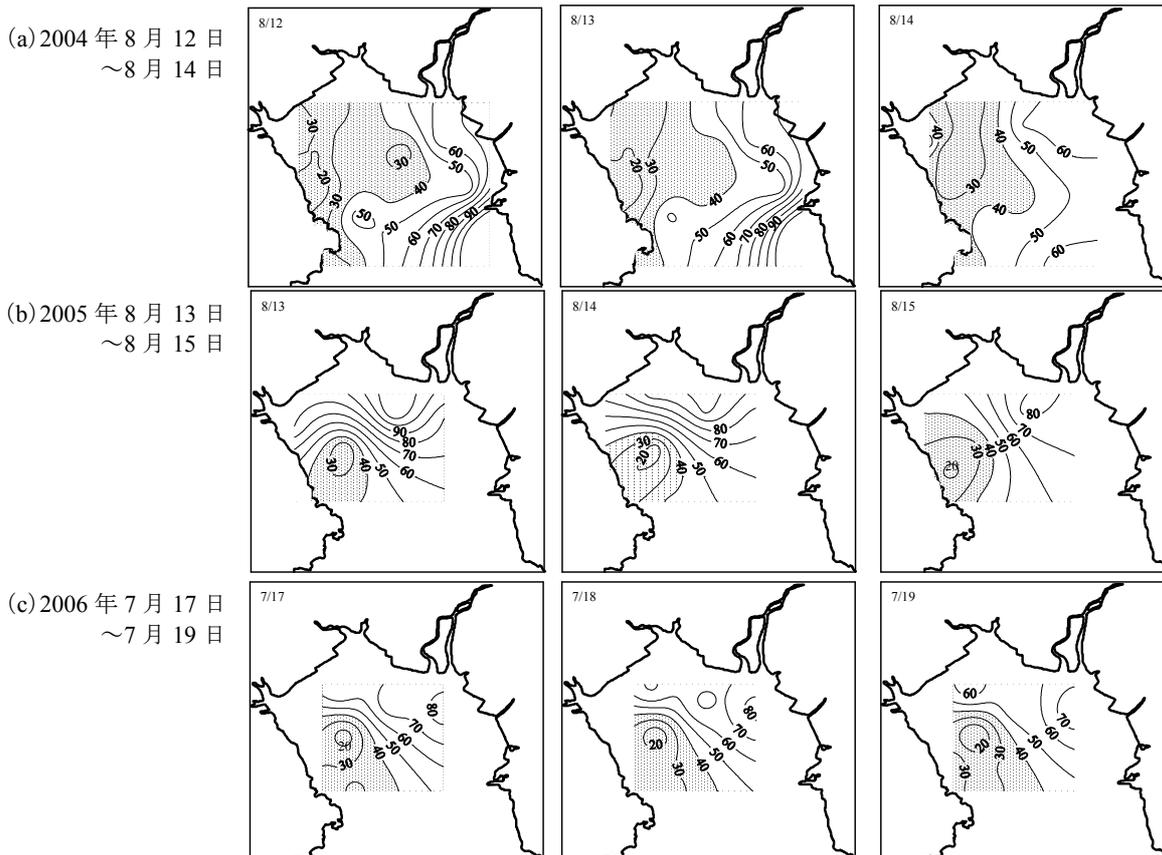


図-3 小潮期における底層付近のDOの水平分布

図-2 及び 3 は、有明海等環境情報・研究ネットワークより入手したデータに基づき作成した最近3カ年夏季の奥部における大潮時と小潮時の底層（海底上70cm）のDO分布（1日平均値）を示したものである。図示されるように、大潮時には $DO \leq 40\%$ の海域が局所的に見られるが、小潮時には $DO \leq 40\%$ の海域は西岸域を中心に広範囲にわたって分布している。すなわち、奥部西岸域では夏季の小潮時を中心に貧酸素水塊が広域的に発生している。また図-4は、奥部西岸域に位置するSt.1で2006年夏季に計測された底層（海底上50cm）のDO、水位、底層の流速、表層と底層の密度差（ $\sigma_{tb} - \sigma_{ts}$ ）及び波高の経時変化を示したものである。図示されるように、この測点における底層のDOは、基本的には小潮時に大きく低下し、逆に大潮時に急増する経時変化を示している。すなわち、図-2の場合と同様に、貧酸素水塊の発生は小潮時を中心に観察される。また、DOの経時変化は、（ $\sigma_{tb} - \sigma_{ts}$ ）とは逆の経時変化を呈している。したがって、貧酸素水塊が発生している小潮時には密度成層が発達し、（ $\sigma_{tb} - \sigma_{ts}$ ）が増大するが、貧酸素水塊が発生しない大潮時には海水の鉛直混合が活発化し、（ $\sigma_{tb} - \sigma_{ts}$ ）が減少する。ところで、8月18日～19日と8月31～9月1日においてDOが突発的に急増し、逆に（ $\sigma_{tb} - \sigma_{ts}$ ）が急減している。これは、波高データとの対比から明らかなように台

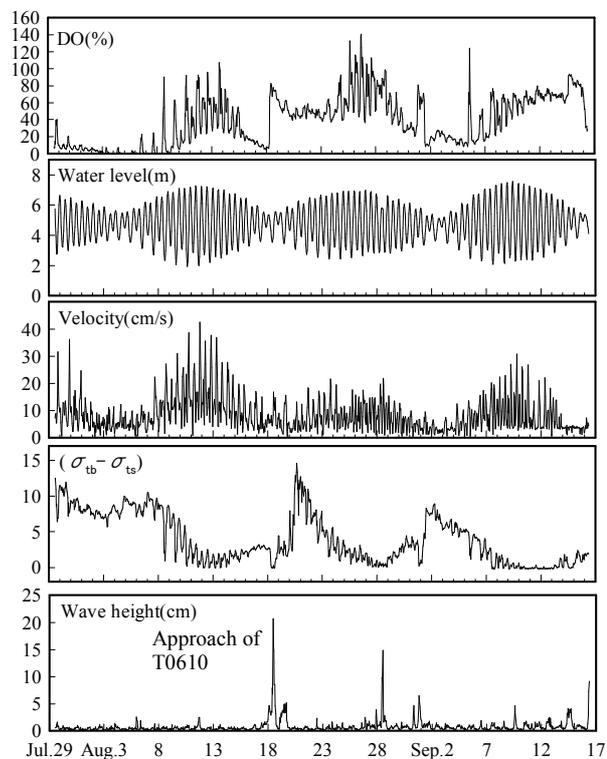


図-4 St.1におけるDO、水位、流速、 $(\sigma_{tb} - \sigma_{ts})$ 及び波高の経時変化（2006年）

風 T0610 及び強い南風に伴い波高が増加し、海水の鉛直混合が増加したためによるものと考えられる。さらに図-5は、2006年9月1日の横断方向のDOと

海水密度の鉛直プロファイルを示したものである。図示されるように、湾中央部の測点 d' ~ e' を除いた表層（海面~3m）では、海水密度は鉛直方向にほぼ一様となり、混合状態は強混合となっている。これは、観測日において波高が比較的高かったために、波動に伴う海水の攪乱が表層に及んだためと推察される。しかし、3~6m の層には明確な密度躍層が観察される。そして、その下層には 40%以下の貧酸素水塊が形成されている。

一方、**図-6** は、9月2日（小潮時）の St.1 及び St.2 における海水密度 (σ_t)、DO 及びクロロフィル

-a (Chl-a) の鉛直プロファイルの経時的推移を示したものである。図示されるように観測期間を通じ、St.1 及び St.2 において、それぞれ海面から 2~3m 及び 4~6m 付近に密度躍層が存在し、顕著な密度成層構造が形成されている。また、両地点において DO は密度躍層以深では 2~3mg/L と低く、逆に密度躍層以浅の表層では 10 数 mg/L と高い。すなわち、底層の貧酸素水塊と表層の過飽和が共存している。なお、この表層の過飽和は植物プランクトンの増殖に伴う酸素の生産に因るものと考えられる。

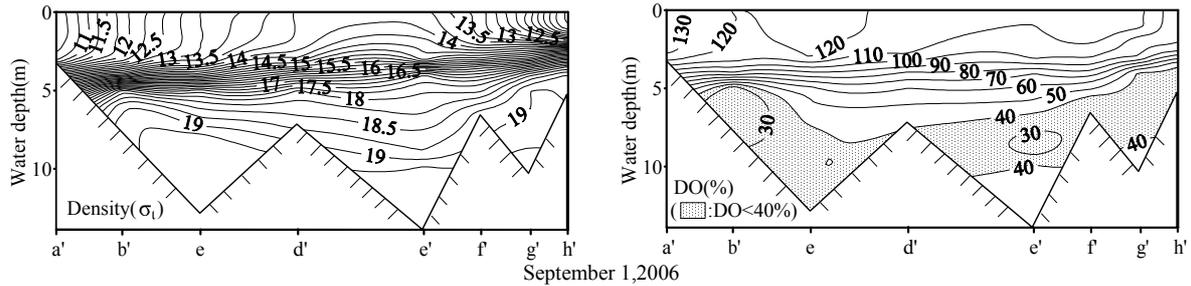


図-5 Line B に沿った σ_t 及び DO の鉛直分布

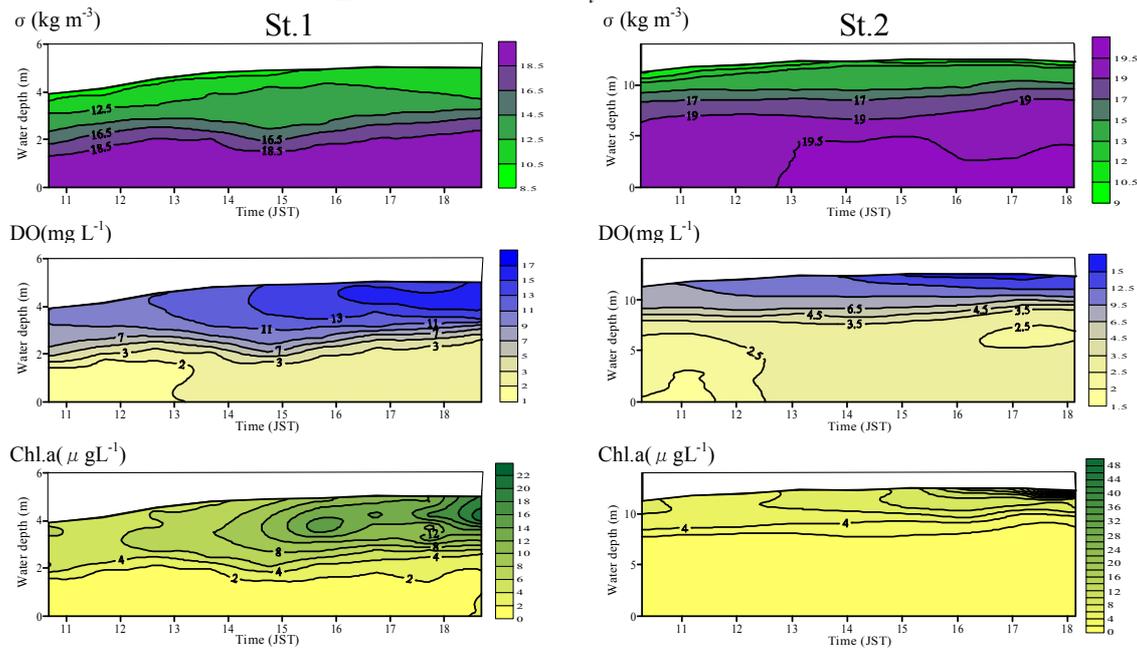


図-6 小潮時(9月2日)における σ_t 、DO 及び Chl-a の鉛直プロファイルの経時変化

以上の測定データに基づく考察結果より奥部西岸域における貧酸素水塊の発生は、概念的に**図-7**のようにまとめられる。すなわち、夏季における降雨量やそれに伴う河川流入量の増加、さらには海面加熱により、表層の密度が大きく低下する。特に、波高が小さく、かつ流速の遅い小潮時には、混合状態は弱混合となり、密度の成層化、安定化が進み、さらには顕著な密度躍層が形成される。そして表層と下層の間に存在する密度躍層が両層間の鉛直混合を抑制し、表層から下層への O_2 の供給能力を大きく低下させる。一方、栄養塩の豊富な表層で増殖した植物

プランクトンの死骸などが底層に沈降したり、また海底から有機物が巻き上げられて懸濁する。そのために、底層に懸濁した有機物は海水温の上昇に伴い、好氣的に分解され、下層の DO を消費する。その結果、表層から下層への O_2 の供給量よりも下層での DO の消費量が増大し、下層の DO は急速に減少して貧酸素状態に至るものと推測される。

2) 密度成層期の鉛直拡散係数の鉛直分布

図-7 のように想定される底層での貧酸素水塊の発生において、特に重要となる要素の 1 つは密度躍

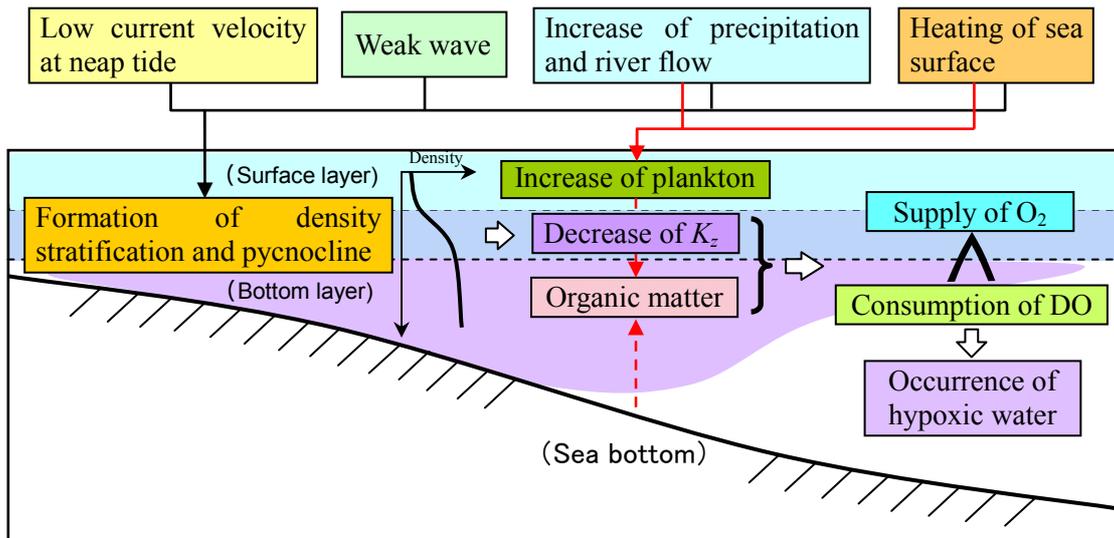


図-7 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生の概念図

層付近の鉛直拡散係数である。図-8は、鉛直方向の乱れ成分より算出した密度成層時(2006年9月2日)のSt.1及びSt.2における鉛直拡散係数 K_z の鉛直分布の時間的推移を表したものである。なお、ここで K_z は、鉛直方向の流速データから有義波高の平均周期に相当する約2秒の移動平均値を差し引いた偏差を乱れ成分とし、次式により算出された。

$$K_z = \beta \overline{w'^2} \int_0^{\tau_c} R_w(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここに、 $\overline{w'^2}$ は鉛直方向の変動流速の二乗平均値、 τ_c は自己相関係数が最初に0になるまでの時間⁵⁾、 R_w は鉛直方向の流速の自己相関係数、 β はEuler自己相関係数とLagrange自己相関係数を関連付ける無次元パラメータで、ここでは村上ら⁵⁾にならい $\beta=1$ とした。

図示されるように、両地点において全体的に K_z は表層及び底層付近で高く、密度躍層付近で低下する傾向が見られる。また、表層及び底層における K_z は、それぞれ $3.1 \sim 21.9 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 及び $11.4 \sim 60.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と大きく変動しているのに対して、密度躍層付近のそれは $3.6 \sim 7.5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と変動は小さい。このことから、躍層の形成により上下層間の鉛直混合は制限されるものと考えられる。したがって、安定した密度成層の形成は、躍層がひとつの障壁となり上層から下層への酸素供給を抑制していると推察される。また、密度成層期における K_z は、一般に(2)及び(3)式に示されるMunk・Andersonの経験式⁶⁾により表される。したがって、両式により、St.1及びSt.2の K_z を求めると、それぞれ $7.3 \sim 38.8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $5.2 \sim 31.6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ となった。これらの値は、本研究で得られた K_z とほぼ同程度の値である。

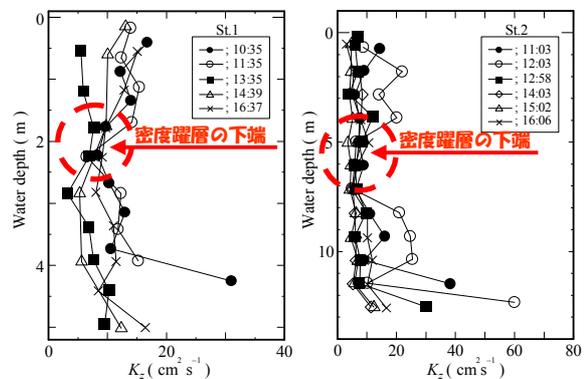


図-8 密度成層時(9月2日)における K_z の鉛直プロファイルの経時変化

$$K_z = K_0(1 + aR_i)^{-b} \quad (2)$$

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

ここに、 K_0 は中立状態($R_i=0$)の場合の鉛直拡散係数で $K_0=1$ 、 $a=3.33$ 、 $b=3/2$ 、 R_i はリチャードソン数、 ρ は海水密度($=\sigma_t+1$)、 g は重力加速度、 z は鉛直座標、 U は水平流速である。

3) 底層の酸素消費速度

上述したように貧酸素水塊の発生時において、躍層付近の鉛直拡散係数と同様に重要な要素は、底層での酸素消費速度である。表-1は、2006年8月24日と9月2日にSt.1及びSt.2で採取した底層水と底泥を用いて酸素消費実験を行った結果を一覧したものである。両地点における底泥の酸素消費速度(R_s)は、 $1.09 \sim 1.49 \text{ gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の範囲にあり、中山ら⁷⁾が2002年7月に有明海北西部で得た R_s の実測値

0.84~1.04 $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ とほぼ同程度の値である。また、St. 1 及び St. 2 における密度躍層下の底層水の酸素消費速度 (R_w) は、平均でそれぞれ 1.01 $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、1.14 $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ である。さらに、9月2日の観測結果より密度躍層下端から海底までの深さを底層厚とすると、底層厚は St. 1 で 2m、St. 2 で 7m となり、密度躍層下の底層水と底泥を含めた層内の酸素消費速度 (R_{sw}) は、それぞれ平均 1.64 $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 及び 1.33 $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ となる。したがって、 R_w の R_{sw} に占める割合は、St. 1 で平均 63.2%、St. 2 で平均 79.2% であり、密度躍層下における酸素消費には R_w が大きく寄与しているものと推察される。また、本研究で得られた R_{sw} の値は、中山ら⁷⁾や徳永ら⁸⁾が見積もった海底から 5m 層内の酸素消費速度 (0.19~1.31 $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、1.54 $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$) とほぼ同程度の値である。

図-9 は、8月24日の St. 1 及び St. 2 における底層水の R_w と POC との関係を表したものである。図示されるように、両者の間には比較的高い正の相関が見られ、POC の増加に伴い R_w は増大する。すなわち、 R_w は海水中の懸濁態有機物量に大きく依存する。したがって、表層から底層に沈降する植物プランクトンや潮流や波浪により海底から巻き上げられたデトリタスなどの有機物は、底層付近の酸素消費速度を大きく左右しているものと推察される。

表-1 St. 1 及び St. 2 における R_s , R_w 及び R_{sw}

調査地点		R_s ($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)	R_w ($\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$)	R_{sw} ($\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$)
2006/8/24	St.1	1.25	1.08	1.70
	St.2	1.49	1.08	1.29
2006/9/2	St.1	1.25	0.95	1.58
	St.2	1.09	1.21	1.37

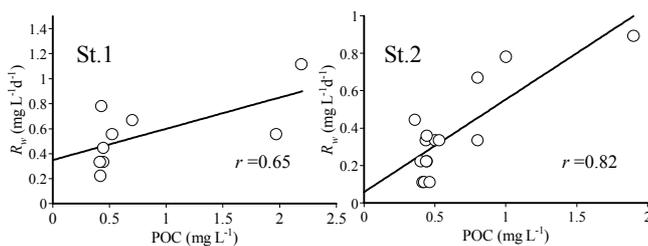


図-9 St. 1 及び St. 2 の底層における R_w と POC の関係

4) ボックスモデルによる貧酸素水塊の解析

(1) 使用データ

貧酸素水塊の発生の全般的な概要を把握するために、既存の現地観測データを用いてボックスモデルによる解析を行った。解析に使用した海水温 (T)、塩分 (S) 及び DO のデータは、図-1 に示される St. A ~ J における佐賀県浅海定線データ²⁾である。各測点のこれらのデータは、海面下 0m、5m、10m、20m、30m、40m で得られており、本研究では、これらのデ

ータを水深 1m 間隔に線形補間した。なお、 ρ は T 及び S のデータより算出した。気象データに関しては、佐賀地方気象台で得られた毎月の平均値を用いた。また、有明海奥部西岸域に流入する河川流量に関しては、集水面積と月降水量から推定した。

(2) 解析方法

ここでは、貧酸素水塊が頻発する有明海奥部西岸域の図-1 の破線で囲まれた海域を図-10 に示される 2 層のボックスモデルで近似した。上、下層ボックスの境界深さ (H_1) は 2005 年 8 月の現地観測で得られた密度躍層の水深 4m とした。上、下層内の塩分 (S_1, S_2) 及び DO (C_1, C_2) は、各層内に含まれる St. A ~ E (図-1) の S と DO の値を平均して求めた。また、東西方向のボックス外の塩分 (S_3, S_4) 及び DO (C_3, C_4) と南北方向のボックス外の塩分 (S_5, S_6) 及び DO (C_5, C_6) は、それぞれ St. F ~ H (図-1) 及び St. I ~ J (図-1) の S と DO の値を海面 ~ H_1 と H_1 以深で平均して求めた。なお、各ボックスの諸元は表-2 に一覧される。さらに各ボックスにおける塩分収支及び水収支は、それぞれ次式で表される。

上層ボックス:

$$V_1 \frac{dS_1}{dt} = -u_1 A_1 S_{13} + w A_{12} S_{12} + u_3 B_1 S_{15} + \frac{K_z (S_2 - S_1) A_{12}}{H_{12}} \quad (4)$$

$$u_1 A_1 = Q + w A_{12} + u_3 B_1 \quad (5)$$

$$Q = Q_r + Q_p - E \quad (6)$$

下層ボックス:

$$V_2 \frac{dS_2}{dt} = -u_2 A_2 S_{24} - w A_{12} S_{12} + u_4 B_2 S_{26} + \frac{K_z (S_1 - S_2) A_{12}}{H_{12}} \quad (7)$$

$$u_2 A_2 = -w A_{12} + u_4 B_2 \quad (8)$$

ここに、 V_1, V_2 はそれぞれ上、下層ボックスの体積、 $A_{12}, A_1, A_2, B_1, B_2$ はそれぞれ上、下層ボックスの水平断面積、上、下層ボックスの東西方向の鉛直断面積及び南北方向の鉛直断面積、 u_1, u_2 はそれぞれ南北方向の上、下層の水平流速、 u_3, u_4 はそれぞれ東西方向の上、下層の水平流速、 w は上、下層ボックス間の鉛直流速、 H_{12} は上、下層ボックスの中央点間距離、 $S_{ij} = (S_i + S_j)/2$ 、 Q は上層ボックスへの淡水流入量で、河川からの流入量 (Q_r) と降雨量 (Q_p) 及び蒸発量 (E) を考慮した正味の値であり、 E は次式により推定された⁹⁾

$$E = k(E_s - E_a)W \quad (9)$$

ここに、 k は蒸発係数 ($=0.17\text{mm d}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{sm}^{-1}$)⁹⁾、 E_s は観測された海面水温から計算した飽和蒸気圧、 E_a は佐賀気象台で観測された月平均大気蒸気圧、 W は佐賀気象台で観測された月平均風速である。

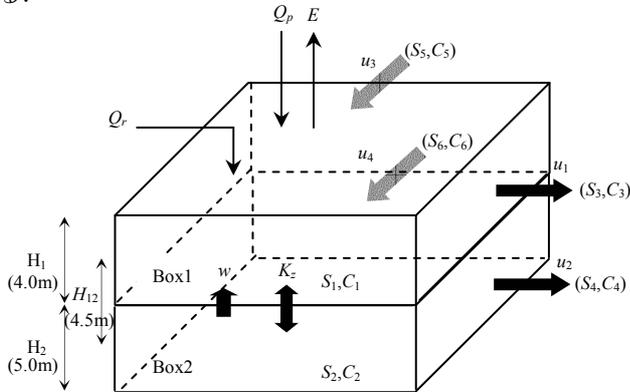


図-10 ボックスモデルの概要

表-2 各ボックスの諸元

Volume (km ³)	V_1	0.426
	V_2	0.533
Interface Area (km ²)	A_{12}	106.56
Cross Section Area (km ²) (East-West)	A_1	0.029
	A_2	0.037
Cross Section Area (km ²) (North-South)	B_1	0.058
	B_2	0.072

(4), (5), (7), (8)式から明らかなように、これらの式中には未知数は $u_1 \sim u_4, w, K_z$ の6個あるため、解析的に未知数を求めることは出来ない。そこで、ここでは1972~2000年の各月29個のデータについて、最小二乗法を適用し、各月の未知数を決定した¹⁰⁾。

一方、下層ボックスにおけるDO濃度の時間的変化を支配する方程式は、次式で表される。

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = -u_2 A_2 C_{24} - w A_{12} C_{12} + u_4 B_2 C_{26} + \frac{K_z (C_1 - C_2) A_{12}}{H_{12}} - V_2 R \quad (10)$$

ここに、 $C_{ij} = (C_i + C_j)/2$ 、 R は生化学的な酸素消費速度である。

(3)解析結果

図-11は、ボックスモデルにより得られた解析対象海域における K_z 及び R と密度成層度(P)¹¹⁾の月変動を表したものである。なお、 P は次式で定義

される。

$$P = \int_0^H |\rho(z) - \bar{\rho}| g dz \quad (11)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho(z) dz \quad (12)$$

ここに、 H は水深である。

図示されるように、 K_z は P の季節変動とは逆に、夏季~秋季に減少し、冬季~春季に増加する季節変動を示す。すなわち、夏季~秋季においては淡水流入量の増加や海面加熱などにより密度成層が発達し、界面付近の乱れが抑制されるため、 K_z は減少する。しかし、冬季~春季にかけては淡水流入量の減少や海面冷却などにより密度成層が消滅し、乱れが進展するために、 K_z は増加するものと推察される。一方、 R は春季~夏季に正となり、秋季~冬季に負となる傾向を示す。 R のこのような変化は、下層での生化学的な O_2 の消費と生産の季節変動を示すものであり、春季~夏季における O_2 の消費には、海水温の上昇や海水中有機物量の増加が、また秋季~冬季における O_2 の生産には、透明度の上昇による植物プランクトンの光合成の活性化が大きく関与しているものと考えられる。なお、本解析で得られた夏季の R は $1.0 \sim 1.5 \text{mg L}^{-1} \text{d}^{-1}$ で、3.(3)の酸素消費実験により見積もられた R_{sw} ($1.29 \sim 1.64 \text{mg L}^{-1} \text{d}^{-1}$)と同程度の値である。

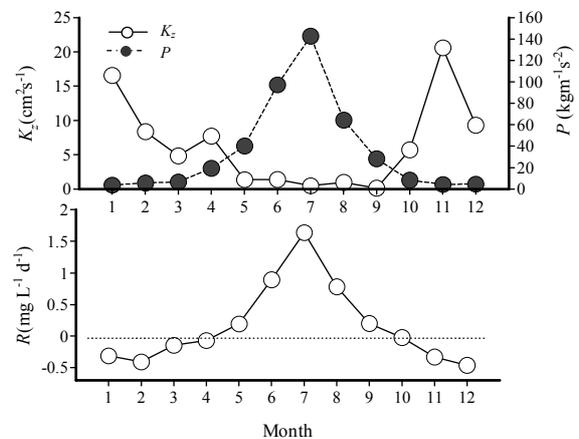


図-11 P, K_z 及び R の月変動

図-12は、(10)式右辺各項の月変化を示したものである。図示されるように、1月~5月、11月、12月の春季、冬季においては、1日当たりの南北及び鉛直方向の移流量は非常に大きい、6月~10月の夏季、秋季においては急減し、他の量とオーダ的にほぼ等しくなっている。これは、夏季を中心に安定した密度躍層が形成されるために、鉛直方向の移流量さらにはそれを補充するための南北方向を中心とする移流量が大きく抑制されたためと推察される。一方、1日当たりの東西方向の移流量、鉛直方向の

拡散量及び消費量は年間を通じて全般的に小さい。しかし、特に鉛直方向の拡散量は4月から10月にかけて徐々に低減するが、消費量は4月から7月にかけて増加した後、7月から10月にかけては減少する。これらの量の月変化から推測されるように、鉛直方向の拡散量や消費量のD0の時間的変化に寄与する割合は、春季、冬季においては僅少であるが、夏季、秋季では、特に消費量のそれは増大し、D0の時間的変化さらには分布を大きく左右すると考えられる。

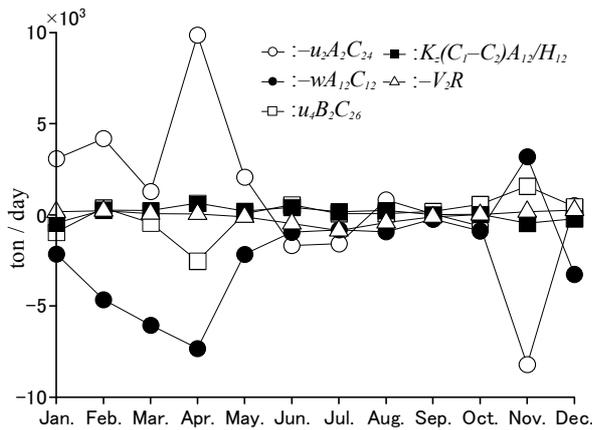


図-12 (10)式右边各項の月変化

4. まとめ

今回の研究で得られた主な知見は、次のように要約される。

- (1) 奥部西岸域の貧酸素水塊は、基本的には強い密度躍層が形成される夏季の小潮時を中心に発生した。しかし、台風の接近や強い波などがあった場合、一時的に貧酸素水塊の消滅が観察された。
- (2) St. 1 及び St. 2 で実測された鉛直成分から K_z が算定され、密度成層期における K_z の分布性が明らかにされた。すなわち、 K_z は表層及び底層で高く、密度躍層下端付近で低下する傾向を示した。したがって、海水の密度成層化は、表層から下層への酸素供給能力を抑制するものと考えられた。
- (3) 酸素消費実験の結果より、 R_w の R_{sw} に占める割合は、St. 1 で平均 63.2%、St. 2 で平均 79.2%であった。また、両地点における R_w は POC の増加に伴い増大する傾向を示した。このことより、底層 D0 の消費には表層から底層に沈降する植物プランクトンの死骸や潮流、波浪などにより巻き上げられたデトリタスなどの懸濁態有機物が大きく影響しているものと推察された。
- (4) 1972~2000 年の浅海定線調査データを用い、2 層ボックスモデルより奥部西岸域における P 、 K_z 及び R の解析を行った。その結果、 K_z は P

とは逆に夏季~秋季に減少し、冬季~春季に増加する変動傾向を示した。また、 R は春季~夏季に正 (O_2 消費)、秋季~冬季に負 (O_2 生産) となる季節変動を示した。

- (5) 奥部西岸域における底層の D0 の時間的変化には、春季、冬季では南北及び鉛直方向の移流量が、また夏季、秋季では鉛直方向の拡散係数及び消費量が大きく影響すると推察された。

謝辞: 本研究を実施するに際し、平成 17 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)、代表: 瀬口昌洋) 及び佐賀大学有明海総合研究プロジェクトより、多大なる支援を受けた。このことを、ここに付記し、深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会: 最終報告—有明海の漁業と環境の再生を願って—, 1-11, 2003
- 2) 佐賀県: 浅海定線水質調査結果, 有明海等環境情報・研究ネットワーク, 1972-2000
- 3) 日本海洋学会編: 沿岸環境調査マニュアル II, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 296, 1990.
- 4) 環境庁: 瀬戸内海の干潟, 浅海域の浄化機能, 平成 11 年度環境庁委託業務報告書, pp. 134, 2000.
- 5) 村上和男, 森川雅行: 超音波流速計による潮流観測と水平・鉛直拡散係数の算定, 港湾技術研究所報告, 22(2), pp. 175-211, 1983.
- 6) Munk W.H., E.R. Anderson: Notes on a theory of the thermocline, *J. Mar. Res.*, 7, pp. 276-295, 1948.
- 7) 中山哲巖, 佐伯信哉, 時吉学, 木元克則: 有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 50, pp. 976-980, 2003.
- 8) 徳永貴久, 松永信博, 阿部淳, 児玉真史, 安田秀一: 有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験, 土木学会論文集, No. 782/II-70, pp. 117-129, 2005.
- 9) 柳哲雄, 安部良平: 有明海奥部における塩分と DIP・DIN 収支の経年変動, 海の研究, 14(1), pp. 21-33, 2005.
- 10) 柳哲雄, 下村真由美: 有明海における鉛直循環流の経年変動, 九州大学大学院総合理工学報告, 27(4), pp. 367-371, 2006.
- 11) 柳哲雄, 下村真由美: 有明海における成層度の経年変化, 海の研究, 13(6), pp. 575-581, 2004.

(2007. 3. 19 受付)

2006年夏季における有明海湾奥部海水中の 貧酸素水塊と鉄の濃度化

CHANGE IN IRON CONCENTRATION AT DIFFERENT DEPTH IN THE ARIKAE
SEE IN SUMMER, 2006 WITH SEPECIAL REFRENCE TO HYPOXIC AREA

田端正明¹・大久保壮志²・速水祐一³・濱田孝治⁴
Masaaki TABATA, Takeshi OHKUBO, Yuichi, HAYAMIA, HAMADA

¹理博 佐賀大学教授 理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

² 佐賀大学理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Iron concentration in the Ariake sea was determined for the samples collected at different depths of 1, 5(4), 10, and 15 m and of 1m from the bottom at 7 different points from June 30 to August 25, 2006. The collected each sample was divided to two parts; one was filtered through a 0.45 μm membrane filter and other was not. All samples were acidified by addition of ultra-pure hydrochloric acid (1 mol dm^{-3}). The concentration of iron was determined by a graphite farness method using a Hitachi Zeeman Polarized Atomic Absorption Spectrophotometer. High concentration of sodium chloride interfered for the determination of iron at ppb level. The interference was removed by addition of ultra-pure nitric acid to the samples before determination, because NaCl easily vaporizes as HCl in acidic solution at a preheating process ($750 \text{ }^\circ\text{C}$). Iron involved in the filtrated sea water was a range of 30 to 1 ppb and the concentration depended on weather and sea depth. High iron concentrations were observed on rainy days or after the rain that suggests that iron was mainly supplied from the rivers and the supply from the sediment was small. As the serious hypoxia occurred in the summer, 2006, the change in iron concentration, especially at bottom, is discussed from the view points of decrease in dissolved oxygen (DO).

Key Words : Iron concentration, hypoxia, DO

1. はじめに

有明海は九州西部の佐賀, 長崎, 福岡, 熊本の四県に囲まれた南北96キロメートル, 幅は平均18キロメートルの北から南に向かって大きく入り込んだ内湾である。その総面積は約1700 km^2 である。この有明海には約1万年の間に, 阿蘇・久住山系からの火山灰質の土砂や, 背振・天山山系の花崗岩質砕せつ物が筑後川, 本明川, 六角川, 嘉瀬川, 矢部川, 菊池川, 白川, 緑川の河川により有明海へ運ばれてきた懸濁粒子が堆積して, 干潮時には国内の総干潟面積の約42%にあたる263 km^2 もの広大な干潟(海岸線から最大6km)が出現する。このため有明海の平均水深は約20mと非常に浅く, それに加えて, 干満の差が最大で6mと非常に大きいので, 底泥の巻き上げにより海水は濁っている。海水中の浮泥は河川から流入する窒素やリンを吸着するので有明海は他の海に比べて, 富栄養化が起こりにくいと言われてい

る¹⁾。海水のニゴリによる光の透過率の減少と浮泥の作用による富栄養化の抑制は有明海における赤潮発生の頻度が少ない要因である。しかし, 近年有明海において貧酸素水塊が形成されている^{2,3,4,5)}。貧酸素水塊はタイラギの瀬死など貝類漁獲量の減少および赤潮発生の要因の一つとして考えられる。

赤潮は, 一般に富栄養化した沿岸水域において発生し, 著しく高い密度まで増殖した結果生じる海の着色現象である。その発生機構の一つとして, 河川からの流入や, 雨水, 堆積物の溶解などによって一時的な鉄の大量供給が起こり, 赤潮藻類の大量発生に影響及ぼす可能性がある⁶⁾。有明海では1989年以降, 夏季に有害プランクトンであるシャトネラの赤潮が発生し, 魚介類の斃死など, 漁業に大きな被害を与えている。有明海の貧酸素水塊は, 湾西部の沿岸干潟域に発生する^{2,5)}。速水は有明海西部の塩田川沖水道上のラインで貧酸素水塊が発生することを示している⁷⁾。このような貧酸素水塊の形成によって, 底泥から鉄が溶出し, 特

に底層では高濃度になり、それがシャネトラ増殖を促進している可能性がある、というものである²⁾。しかし、これまで有明海において海水中の鉄の分布を連続的に測定した例はなく、上記の説は検証されていない。

本研究では、夏季の有明海湾奥部における鉄の分布の変動を明らかにすることを目的とし、貧酸素水塊形成と鉄の濃度変化の関係について検討した。

2. 実験

(1) 試料および採取地点

本研究では貧酸素水域の発生が見られた有明海の塩田川沖水道に沿った7地点 (A01~B4) で、船上から表層から1m, 5m, 10m, 15m, 底層から1mと深度を変えてサンプリングを行った (図1)。具体的な採水地点と深度は以下の通りである。A01, 表層から1m, 底層から1m; A03, 表層から1m, 4m底層から1m; A10, 表層から1m, 5m, 底層から1m; A13, 表層から1m, 5m, 10m, 底層から1m; B02, 表層から1m, 5m, 10m, 底層から1m; B12, 表層から1m, 5m, 10m, 15m, 底層から1m; B14, 表層から1m, 5m, 10m, 15m, 底層から1m。

採水は6月27日, 7月3日, 7月13日, 7月20日, 7月23日, 7月26日, 7月30日, 8月5日, 8月8日, 8月25日の計10日間行い、満潮を挟んで3時間以内に完了するようにした。

(2) 実験操作

採水した試料の一部は現場で $0.45\mu\text{m}$ メンブランフィルタでろ過した。もう一つはろ過しない試料とした。いずれも、直ちに実験室で $3\text{mol}/\text{dm}^3$ 塩酸 1ml を添加した。その各々のサンプルを偏光ゼーマン原子吸光度計 Hitachi High-Technologies 社 Z-2000 を用いてグラファイトファーネス法で測定を行った。測定容器は、鉄の混入を防ぐためにフッ素容器を用いた。採水試料容器は1昼夜 $1\text{mol}/\text{dm}^3$ の硝酸容器浸した。蒸留水は精密再蒸留水を用いた。海水の塩化物はグラファイトファイトファーネス法で超微量の鉄 (ppbレベル) の定量に妨害をもたらしたので、次のようにしてその妨害を除いた。試料に超精密濃硝酸溶液を加え海水中の塩化物イオンをHClとして余熱過程 (700 °C) で揮発させた。更に全試料について硝酸銀滴定により試料中の塩化物イオンの濃度を定量し、塩化物イオン濃度ごとに検量線を作成し、試料中の鉄の濃度を求めた。用いた試薬は、有害金属分析用塩酸 (和光純薬工業製) と超微量分析用硝酸 (和光純薬工業製) である。

3. 結果と考察

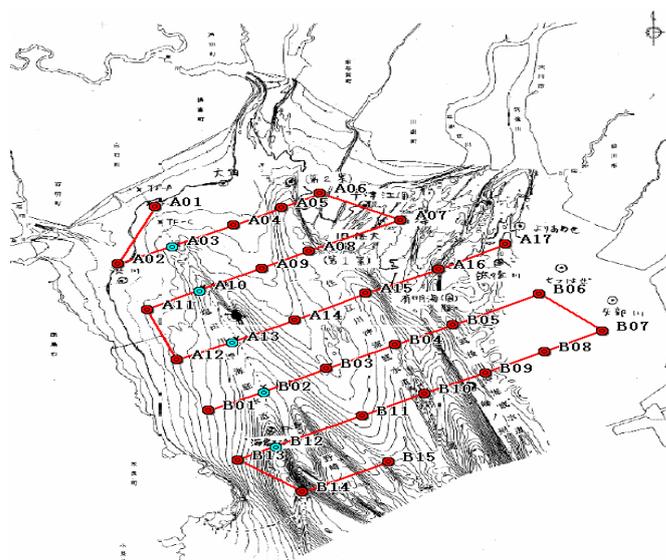


図1. 採水地点

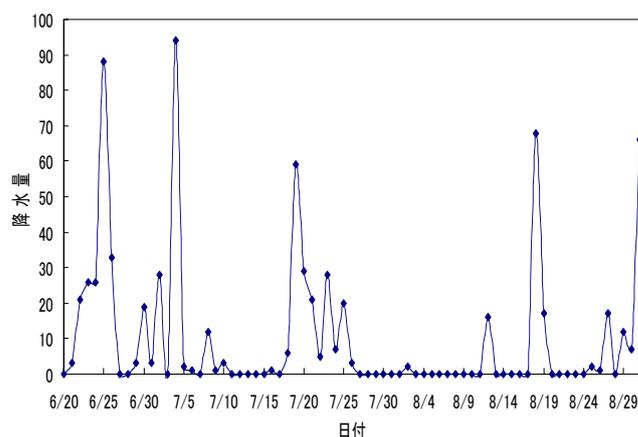


図2. 調査期間中の降雨量

(1) 降水量と鉄の濃度

海水中の鉄の濃度は河川からの流入、特に雨による影響が大きいため、調査期間中の測定地域 (白石) の降雨量を図1に示す。2006年6月末から7初めにかけてまとまった降水量があり、7月半ば過ぎにはまたまとまった雨となった。梅雨明けが7月末で例年に比べて遅かった。

8月18日には降雨量は少ないが台風10号が通過している。

溶存鉄濃度を深度別に表にまとめたものを表1, 2に示す。溶存鉄濃度は30 ppbから1ppb以下の範囲で変化した。表層1mおよび表層からの溶存態の鉄の濃度は降水時 (6月27日と7月, 20, 23日) に高くなるが、数

表1. 表層1mにおける溶存態鉄の濃度(PPb)

	A01	A03	A10	A13	B02	B12	B14
2006.06.27	306	7.0	5.4	4.4	3.7	1.4	1.3
2006.07.03	10	9.1	7.3	6.2	2.3	<1.00	3.9
2006.07.13	2.7	1.9	1.3	<1.00	<1.00	1.1	<1.00
2006.07.20	12.2	4.2	2.0	<1.00	<1.00	1.5	<1.00
2006.07.23	11.4	18.4	8.8	10.1	6.5	3.1	3.1
2006.07.26	4.6	5.2	2.0	2.3	<1.00	6.4	3.7
2006.07.30	3.2	4.9	1.1	1.2	<1.00	1.2	<1.00
2006.08.05	7.1	3.5	2.3	4.5	4.4	<1.00	<1.00
2006.08.08	2.9	1.8	<1.00	1.1	<1.00	2.3	<1.00
2006.08.25	1.0	<1.00	<1.00	<1.00	1.9	4.39	6.3

表2. 底層から1mにおける溶存態鉄の濃度(PPb)

	A01	A03	A10	A13	B02	B12	B14
2006.06.27	27.5	1.4	4.5	2.4	3.5	4.9	
2006.07.03	9.6	6.2	4.3	4.5	2.2	2.9	3.8
2006.07.13	3.2	2.0	2.4	2.7	3.2	2.4	<1.00
2006.07.20	2.7	2.1	1.3	1.1	<1.00	<1.00	3.3
2006.07.23	12.0	17.0	6.8	2.9	<1.00	1.5	2.2
2006.07.26	1.6	3.9	5.1	2.0	1.1	1.10	1.3
2006.07.30	3.1	3.7	2.1	<1.00	1.1	1.1	<1.00
2006.08.05	2.6	2.4	2.0	5.1	2.2	<1.00	<1.00
2006.08.08	1.5	<1.00	<1.00	3.4	6.6	1.3	<1.00
2006.08.25	1.7	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	5.2	5.4

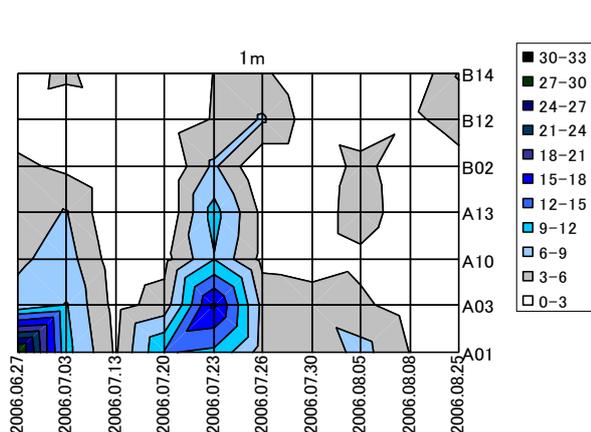


図2. 表層1mにおける溶存態鉄の濃度(PPb)

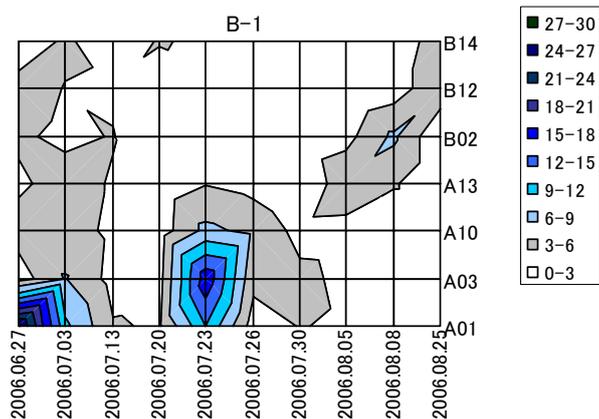


図3. 底層から1mにおける溶存態鉄の濃度(PPb)

日後には10ppb以下に下がっていた。深度別に溶存鉄の濃度分布を図2～3に示す。表層から底層に行くにつれて鉄の濃度は大きく変化しなかった。これは有明海が浅海干潟であるためである。溶存態鉄の濃度は降雨量に関係しており、深度において大きな差がなかった。ただ、台風通過後は底層1mの鉄の濃度は沖合いで若干増大している(図3)。台風による底泥の攪乱とそれによる鉄の底泥からの溶出は少ない。

(2) 濁度と鉄の濃度

有明海の溶存態鉄濃度変動は降水量と関係図づけられた。従って、主要な鉄の供給源は河川からの流入であると考えられる。図4には有明海の測定期間中の濁度を示す。図4と図2および3を比較するとその類似性が明確である。これらの図の比較より、有明海の鉄の濃度は河川から降雨による流入量に強く依存しており、底泥の影響は少ない。

(3) 溶存酸素濃度分布

測定期間中には大規模な貧酸素水塊が発生した⁸⁾。降雨量が多いと表層と底層において密度差により海水において躍層が生じ、底層の酸素濃度が低くなる。更には、小潮時においても沖合いからの高塩分水の流入は底層の酸素濃度を減少させる⁷⁾。溶存酸素濃度が減少すると還元状態になり、鉄が底泥より溶出すると考えられる。

溶存酸素(DO)の濃度分布を表層1mと表層から5(4)m及び底層から1mについて図6—8に示す。表層の酸素濃度は、図5の濁度と比較すると、降雨日から1週間から10日程度遅れて高い濃度を示した。更に、その影響は沖合いまで続いた。しかし、表層から5(4)mのところでは酸素濃度は急激に低くなっている。7月30日のデータがその様子を明確に示している。溶存酸素の濃度はゼロである。更に底層から1mにおける酸素濃度(図8)は沿岸近くで観測された(6ppm)が、沿岸部から遠ざかると直ちにゼロとなり、貧酸素水塊が広がっている。図6と7、8を比較すると明らかなように、表層の溶存酸素濃度分布と中層、底層の酸素濃度分布には直接的な関係は少ない。

酸素濃度は、表層から5(4)mの深さになると激減し、更に底層ではその領域が広がる。これは、表層と中層の間で成層が強まったためであると考えられる。このことは、7月30日における、表層から5(4)mにおける溶存酸素濃度がゼロとなった事からも裏付けられる。有明海の溶存酸素は、表層で高くても、数メートル深い所では、非常に低濃度になる。貧酸素水塊は中層では図7から明らかなように、7月下

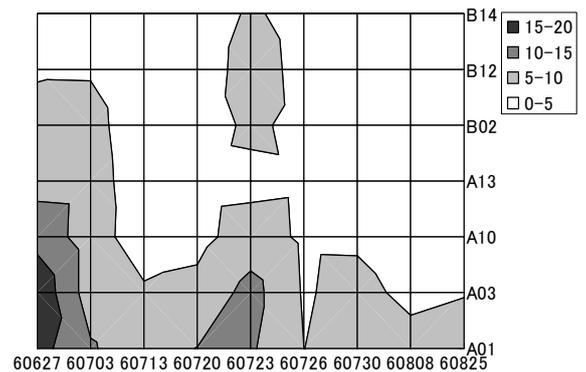


図4. 濁度の分布

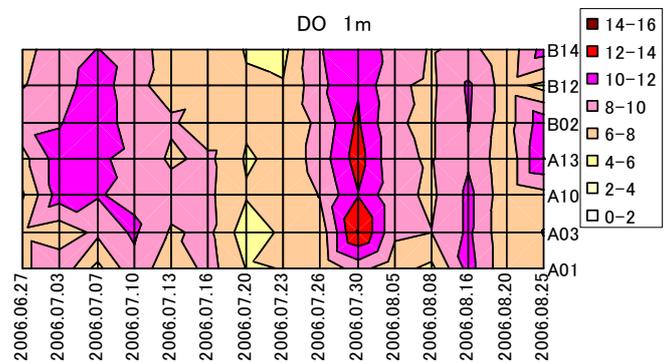


図6. 表層1mの溶存酸素濃度分布

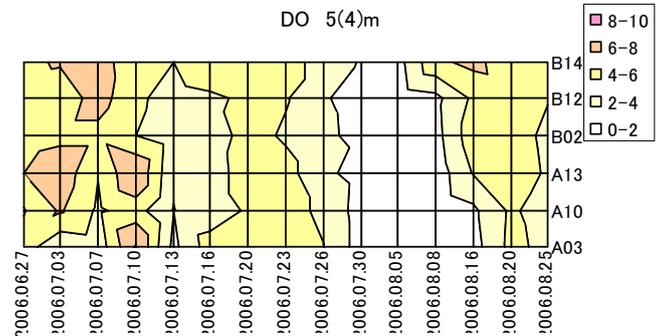


図7. 表層5(4)mの溶存酸素濃度分布

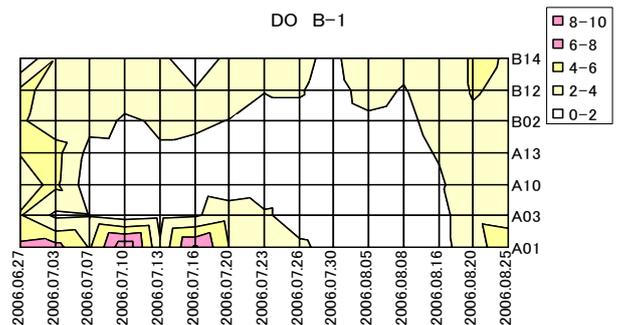


図8. 底から1mの溶存酸素濃度分布

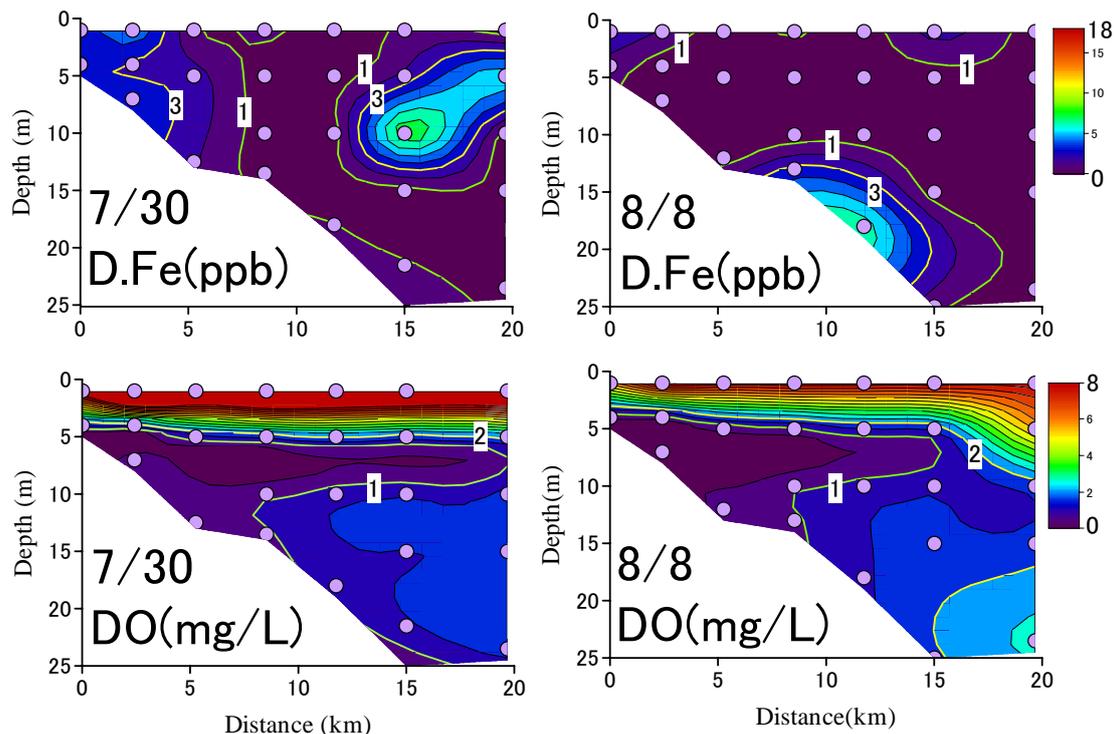


図9. 7/30日と8/8のDOと溶存鉄の空間分布

旬から始まり8月18日の台風通過まで、貧酸素状態が続いた。台風通過後、底泥の貧酸素水塊は少し回復された。回復の原因は8月18日の台風通過により海水が鉛直方向に攪乱されたためである。沿岸から5km離れた底層では、貧酸素水塊は7月始めから8月16日まで続いている(図8)。

(4) 貧酸素水塊と鉄の濃度

溶存酸素濃度の低下による貧酸素水塊と溶存鉄濃度の分布を比較するために貧酸素状態がもっとも深刻化した7月30日と8月8日のデータの空間分布を図9に示す。先に述べたように、降水後海水表面の酸素濃度は増大する。夏季の大量の降雨は海水の階層化をもたらし、底層への酸素供給が減少している。酸素濃度の減少は、海底の還元状態を一層進める。その結果、水酸化鉄はじめFe(III)として沈殿した鉄化合物が還元される。還元されたFe(II)は溶解しやすくなると予想される。溶存鉄の濃度は、7月30日に沖合い15km、深度10mで若干増大した。又、8月8日に沖合い12kmの底泥で鉄の濃度が少し高い濃度であった。しかし、貧酸素水塊の発達に伴った溶存鉄濃度の上昇は見られなかった。

4. まとめ

本研究において、溶存鉄濃度は1ppb以下~30ppbの範囲で存在し、沖域よりも河口付近の方が高濃度となった。溶存鉄濃度は出水後に増加し、その数日後には10ppb以下まで速やかに低下した。表層~底層での溶存鉄濃度は、降水のあるなしにかかわらず深さによって大きく違わなかった。降水によって増加した溶存鉄濃度の影響は表層では沖合い20kmまで続いた。しかし、底層では、降水時でも合い8kmで、溶存鉄の濃度は検出限界以下となった。更に溶存鉄の濃度分布は、海水の濁度と強く関係づけられた。降水後7日から10日後に表層海水の溶存酸素濃度は増大するが、深度5(4)mでは直ちに溶存酸素濃度は減少する。底層における貧酸素水塊は7月始めから8月16日まで続いた。しかし、貧酸素水塊生成に起因する、底泥からの鉄の溶出は見られなかった。

以上の結果より、夏季の有明海湾奥部の溶存鉄濃度分布の変動は出水に伴った陸起源の鉄の影響を強く受けており、海底からの溶出の影響はそれに比べると小さいものであると考えられる。

少なくとも2006年夏季については、貧酸素水塊の形成が鉄の溶出を促進させ、表層に鉄が供給されてシャトネラが増殖するという、これまで考えられてきた機構は確認されなかった。また、測定期間中、シャトネラ赤潮の発生はなかった。

謝辞：本研究は有明海総合研究プロジェクトからの研究費助成の基で実施された。厚くお礼申し上げます。更に、共著者としてあげた以外の有明海総合研究プロジェクトの教員に多大な協力を頂いた。また研究室の学生諸君には、炎天下での海水の試料採水に協力してもらった。感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐々木克之：水底質変化一ノリ漁場栄養塩・調整池水質と諫早湾水質・有明海奥部貧酸素一。「有明海の生態系再生をめざして」，日本海洋学会編，恒星社厚生閣，69-94，2006.
- 2) 環境省：有明海・八代海総合調査評価中間取りまとめ，<http://www.env.go.jp/info/iken/h180328a/index.html>，環境省，pp.139，2006.
- 3) 瀬口昌洋・郡山益美・石垣哲寛・加藤治：有明海湾奥部西

岸域における貧酸素水塊の発生機構の解明とその防止法に関する研究，佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集，Vol. 1, pp. 7-14., 2005.

- 4) 瀬口昌洋・郡山益美・石垣哲寛・古賀あかね：有明海湾奥部における干潟域の脱窒と西岸域の貧酸素水塊の発生について，佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集，Vol. 2, pp. 47-54, 2006.
- 5) 木元克則・田中勝久・中山哲巖・興石祐一・渡辺康憲・西村耕・藤井明彦・山本憲一：連続広域観測で捉えた有明海の貧酸素水塊の動態，2004年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 191, 2004.
- 6) 内藤佳奈子・藻類，Vol. 54, 177-180 (2006).
- 7) 速水祐一・有明海奥部の貧酸素水塊一形成機構と長期変動一，海洋，Vol. 39. pp.22-28, 2006.
- 8) 濱田浩一・速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一・山田浩樹，投稿中

有明海奥部干潟域における脱窒菌群の生息分布 と底質環境について

DISTRIBUTION OF DENITRIFIERS AND BOTTOM SEDIMENT ENVIRONMENT IN TIDAL FLAT OF THE INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA

郡山益実¹・瀬口昌洋²・古賀あかね³・野田美幸⁴
Masumi KORIYAMA, Masahiro SEGUCHI Akane KOGA and Miyuki NODA

¹農博 佐賀大学助手 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農修 鹿児島大学大学院 連合農学研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴株式会社タカギ (〒802-0836 北九州市小倉南区石田南2丁目4番1号)

The relationship between distribution of denitrifiers and bottom sediment environment was investigated in the tidal flat area of inner parts of the Ariake Sea. The number of denitrifiers was high in muddy tidal flat with high mud content. In Higashiyoga Beach where was a typical muddy tidal flat in the interior parts of the Ariake Sea, the number of denitrifiers was low in spring and winter, because tidal bottom-mud in spring and winter tended to become reduced and oxidized layer throughout bottom sediment (surface-10cm depth), respectively. The number was highest in summer because of the formation of redox potential discontinuity (RPD) layer near bottom sediment surface. NH_4^+ in porewater of tidal bottom-mud which related to decomposition of organic matter tended to increase in summer and to decrease in winter. On the other hand, NO_3^- and NO_2^- tended to increase in spring and winter and to decrease in summer due to change of denitrification activity with the number of denitrifiers.

Key words : muddy tidal flat, Ariake Sea, denitrifier, denitrification, RPD layer, inorganic nitrogen

1. まえがき

かつては豊饒の海といわれた有明海では、アサリを始めとする二枚貝や高品質の養殖ノリの高い生産性に加え、海域固有の水産生物も豊富に見られた。しかし、近年、二枚貝類の大量斃死、養殖ノリの好不況の大きな変動、貧酸素水塊発生の激化、赤潮発生の頻発化・大規模化など海域環境は大きく疲弊している。

このような有明海の環境変化については、様々な要因が考えられるが、その1つに、干潟域の喪失に伴う水質浄化機能の低下が指摘されている¹⁾。干潟は物質循環・水質浄化の場であり、赤潮や富栄養化の原因となる汚濁物質を沈降・分解・固定する高い能力を有すると考えられている²⁾。しかし、有明海奥部に形成された広大な泥質干潟域を対象とした水

質浄化能力の調査・研究は少なく、また、水質浄化機能における干潟域底泥の窒素循環に関与する脱窒菌の生息環境や分布性は十分明らかにされていない。

本研究では、干潟域底泥の窒素循環の一部である脱窒作用に着目し、その作用を担っている脱窒菌の分布性、脱窒菌数と底質環境及び底泥内窒素分布量との関連性について現地調査・実験データに基づき検討、考察した。

2. 現地調査及び実験の概要

本研究では、有明海奥部干潟域における脱窒菌の分布性を明らかにするために、**図-1**に示されるような奥部沿岸域の計14地点において2006年6, 8, 11, 12月に底質(表層~深さ4cm)を採取し、菌数の計数及び底質分析を行った。

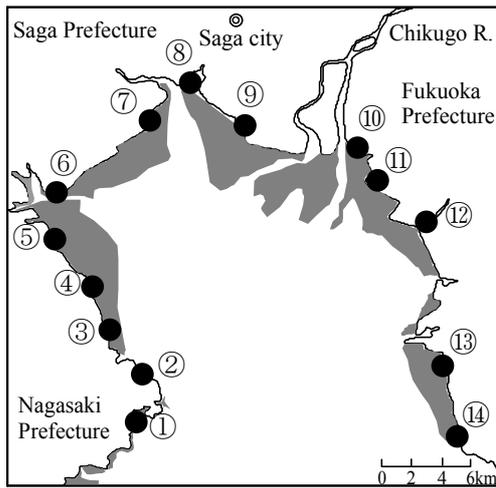


図-1 底質試料の採取地点

また、泥質干潟における詳細な脱窒菌数や底泥間隙水中の無機態窒素分布の季節変化を明らかにするために、佐賀県東与賀海岸(図-1の地点⑨)に調査区を設置した。調査期間は、2006年1~12月のほぼ毎月2回、円筒コア(内径83mm、長さ210mm)を用いて未攪乱状態の底泥(表層~深さ10cm)を採取し、脱窒菌数、底質分析及び底泥間隙水中の無機態窒素濃度の鉛直分布を測定した。

底泥間隙水は、採取した底質試料を厚さ2cm間隔にスライスカットし、各層の試料を遠心分離(4000rpmで5分間)にかけ上澄み液を抽出した。抽出した上澄み液は0.45μmのメンブランフィルターで濾過し冷凍保存した。後日、これらを解凍しオートアナライザー(SWAAT, BLTEC)を用いて無機態窒素濃度(NH₄⁺-N, NO₃⁻-N及びNO₂⁻-N)の分析を行った。

底質分析は、含泥(シルト+粘土)率、酸化還元電位(Eh)、強熱減量(IL)、泥温、有機態窒素(Org-N)、有機炭素(Org-C)の測定を行った。ここで、底質中のIL, Org-N及びOrg-C分析の前処理として、採取した

底質試料を乾燥後メノウ乳鉢で粉碎し、1NHC1を添加して24時間静置し試料中の炭酸カルシウムを処理した。これを蒸留水で洗浄し、60℃で24時間乾燥した。前処理した底質のOrg-N及びOrg-Cの測定は、CHNコーダ(JM-10, J-Science LAB)を用いて分析を行った。

底質中の脱窒菌の計数は、表-1に示される Giltay 培地を用いて1週間培養した後、MPN法³⁾より計数した。なお、泥質干潟底泥からの脱窒速度及び無機態窒素溶出速度を明らかにするために、脱窒速度実験は、Chanら⁴⁾を参考にアセチレンブロック法よりガスクロマトグラフ(G-2700T, Yanaco)を用いて行った。一方、溶出実験では、金ら⁵⁾にならない、現地海水温で培養した直上水中の無機態窒素濃度の時間変化より、溶出速度を算出した。

表-1 脱窒菌用培地

KNO ₃	1.0g
アスパラギン	1.0g
BTB 溶液(1w/v%)	5.0ml
クエン酸ナトリウム	8.5g
MgSO ₄ · 7H ₂ O	1.0g
FeCl ₂ · 6H ₂ O	0.05g
KH ₂ PO ₄	1.0g
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.2g

pH 7.0~7.2 に調整

3. 結果及び考察

(1) 有明海奥部沿岸域における脱窒菌数の分布

図-2及び3は、2006年6, 8, 11及び12月の有明海奥部沿岸域における底質(表層~深さ4cm)の脱窒菌数を表したものである。

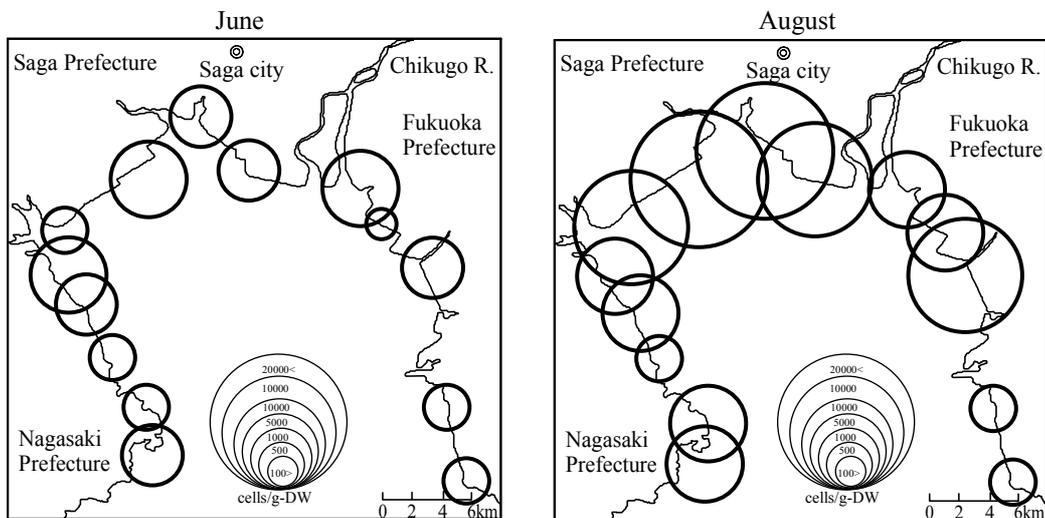


図-2 有明海奥部沿岸域における脱窒菌数の分布(2006年6月及び8月)

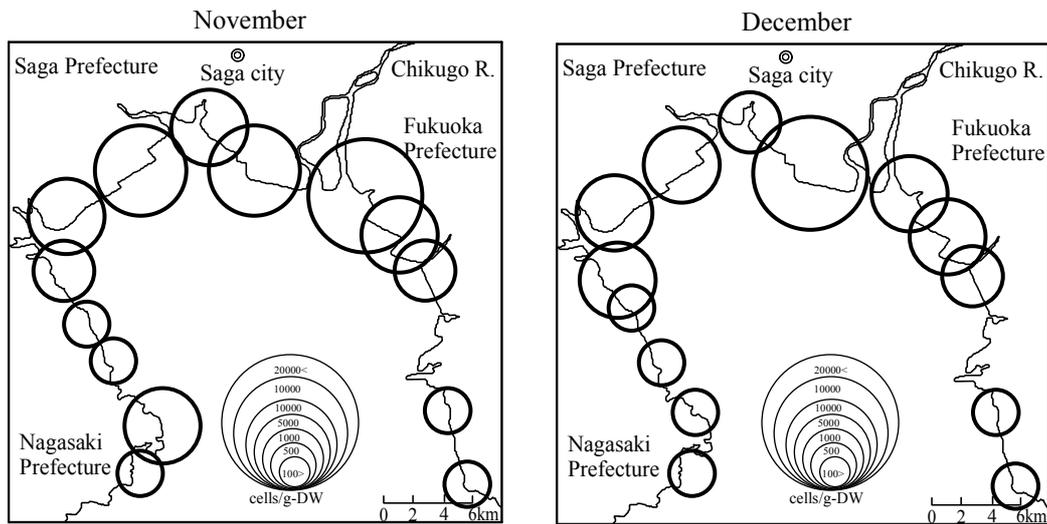


図-3 有明海奥部沿岸域における脱窒菌数の分布 (2006年11月及び12月)

表-2 脱窒菌数, 含泥率, IL, Org-C 及び Org-N の相関係数 (2006年6, 8, 11, 12月)

June	Denitrifiers	Mud content	IL	Org-C	Org-N	August	Denitrifiers	Mud content	IL	Org-C	Org-N
Denitrifiers	1					Denitrifiers	1				
Mud content	0.57*	1				Mud content	0.61*	1			
IL	0.24	0.76**	1			IL	0.25	0.76**	1		
Org-C	0.30	0.58*	0.73**	1		Org-C	0.47	0.78**	0.85**	1	
Org-N	0.67*	0.95**	0.71**	0.63*	1	Org-N	0.44	0.62*	0.81**	0.93**	1

November	Denitrifiers	Mud content	IL	Org-C	Org-N	December	Denitrifiers	Mud content	IL	Org-C	Org-N
Denitrifiers	1					Denitrifiers	1				
Mud content	0.57*	1				Mud content	0.57*	1			
IL	0.47	0.89**	1			IL	0.45	0.86**	1		
Org-C	0.37	0.74**	0.72**	1		Org-C	0.46	0.92**	0.84**	1	
Org-N	0.35	0.64*	0.60*	0.62*	1	Org-N	0.43	0.95**	0.84**	0.92**	1

*P<0.05, **P<0.01

図示されるように, 4回全ての調査において中央部(地点⑤~⑫)で平均 6.1×10^3 cells/g-DW と最も高く, 次いで西岸域(地点①~④)で平均 8.9×10^2 cells/g-DW, 東岸域(地点⑬, ⑭)で平均 2.7×10^2 cells/g-DW となった. これらの奥部沿岸域における脱窒菌数の分布と底質との間には密接な関連性が見られた.

表-2は, 2006年6, 8, 11, 12月における脱窒菌数, 含泥率, IL, Org-C 及び Org-N の相関係数を一覧したものである. これらの結果から明らかなように, 脱窒菌数と含泥率には全調査を通して有意な相関性が見られ, 含泥率の増加に伴い脱窒菌数は増大した. また, 含泥率と有機物量(IL, Org-N 及び Org-C)には高い正の相関性が見られた. このことから, 含泥率が高い底質試料ほど酸化的層, 不連続(RPD)層, 還元的層が共存しやすく, また, 電子受容体である有機物量が増加するために, 通性嫌気性細菌である脱窒菌に適した生息環境であったものと推察される.

有明海奥部沿岸域における脱窒菌数の季節変動は, 全体的に泥温が上昇する8月(泥温の平均値 32.4°C)に増加し, 逆に泥温が低下する12月(泥温の平均値 11.2°C)に減少する傾向が見られた. このような泥温の変化に伴う脱窒菌数の変動は, 特に西岸域~中央部(地点①~⑫)において顕著に見られ, これらの地点における8月の脱窒菌数は12月のそれより約13倍高い値を示した. 一方, 東岸域(地点⑬及び⑭)における脱窒菌数の季節変動は, 全調査期間を通して比較的小さく, 8月の脱窒菌数は12月のその3倍程度であった. このような西岸域~中央部及び東岸域における脱窒菌数の季節変動の差異には, 底質特性の違いによる干潟表層内の酸化還元状態の変化が大きく影響したものと考えられる.

図-4は, 地点①~⑭における夏季(8月)と冬季(12月)の底質(表層~深さ4cm)のEhを比較したものである. 図示されるように, 西岸域(地点①~④: 砂泥質干潟)から中央部(地点⑤~⑫: 泥質干

潟)における干潟表層内の Eh は, 夏季に地点⑤~⑦を除いて 58.6mV~-133.6mV (平均-16.1mV) と低く, 冬季では 85.2mV~363.0mV (平均 269.3mV) と高い. このことから, 夏季では泥温の上昇と脱窒菌の生息環境に適した RPD 層の形成により, 干潟表層内で脱窒菌数が急増し, 冬季では泥温の低下と底泥の酸化的層の拡大により脱窒菌数は減少したものと考えられる. 一方, 東岸域 (地点⑬及び⑭: 砂質干潟) においては, 冬季に Eh の低下が見られるものの, 夏季・冬季共に Eh は高く, 84.5~270.3mV であった. このことから, 全調査期間を通して東岸域における干潟表層内の大部分は酸化的層であったために, 脱窒菌数は少なく, またその季節変動は小さかったものと推察される.

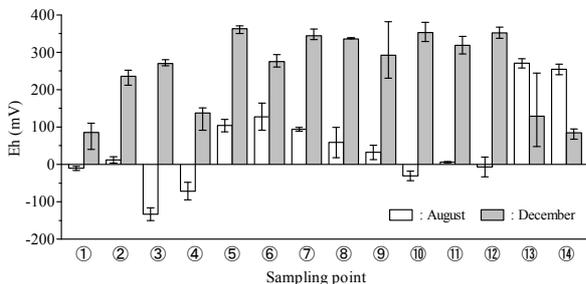


図-4 夏季(8月)と冬季(12月)における底質内の Eh

(2) 泥質干潟における脱窒菌数の季節変化

図-5は, 佐賀県東与賀海岸 (地点⑨: 泥質干潟) における 2006年1月~12月の脱窒菌数と泥温の経

時変化を表したものである. なお, ここで脱窒菌数は各層 (0~2cm, 2~4cm, 4~6cm, 6~8cm, 8~10cm) の総菌数を算出し, 1g 乾重量当たり換算した値である. また, 2月~3月のデータは欠損している. 図示されるように, 4月~6月において脱窒菌数は $7.6 \times 10^2 \sim 1.6 \times 10^3$ cells/g-DW を推移し大きな変動は見られないが, 泥温が高い夏季 (7月及び8月) に $1.9 \times 10^4 \sim 3.4 \times 10^4$ cells/g-DW と急増し, 泥温の低下に伴い秋季から冬季にかけて $1.1 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^3$ cells/g-DW まで減少する傾向が見られた. また, 8月19日には泥温が高いにも関わらず菌数は 2.2×10^3 cells/g-DW に激減した. このような脱窒菌数の増減は, 泥温と共に底泥内の Eh の分布状況が大きく関与しているものと考えられる.

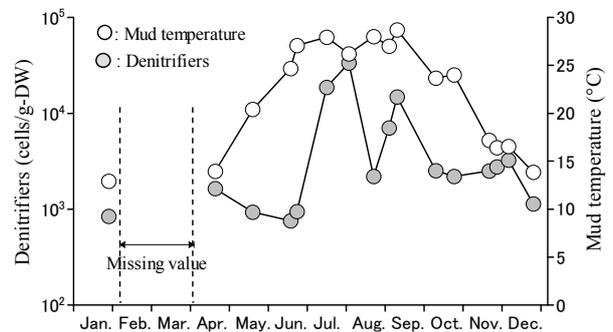


図-5 東与賀海岸(泥質干潟)における泥温と脱窒菌数の季節変動

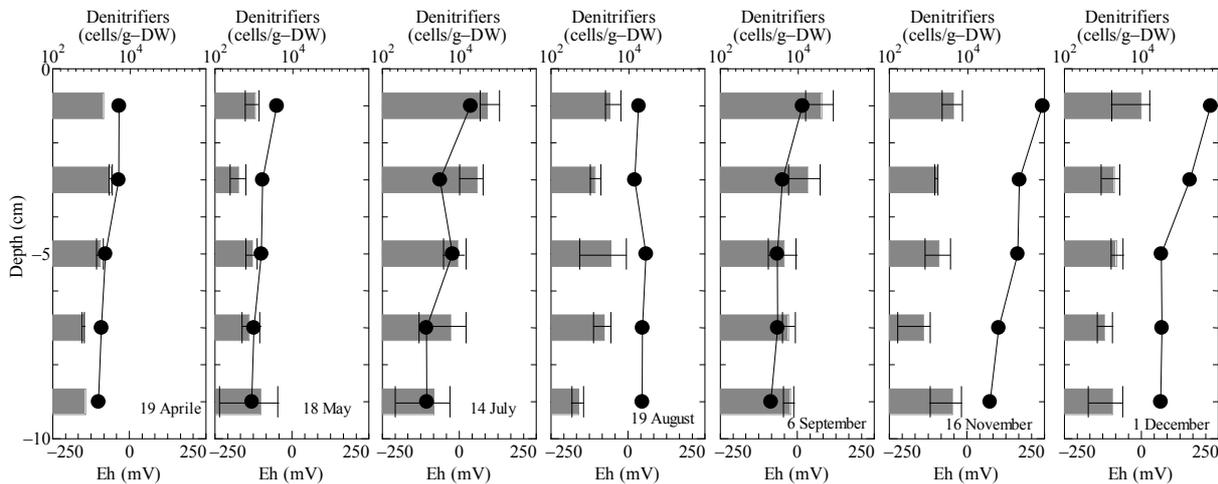


図-6 東与賀海岸(泥質干潟)における脱窒菌数と Eh の鉛直分布 (■: 脱窒菌数, ●: Eh)

図-6は, 佐賀県東与賀海岸における底泥 (表層~深さ10cm) の Eh と脱窒菌数の鉛直分布の季節変化を表したものである. 図示されるように, 底泥 Eh と脱窒菌数の鉛直分布には明確な季節変化が見られた. すなわち, 春季 (4月19日, 5月18日) の底泥は, 全層にわたりほぼ還元的層が形成され, 脱窒菌数は $4.1 \times 10^2 \sim 3.2 \times 10^3$ cells/g-DW と比較的少なく,

一様な分布傾向が見られた. 夏季 (7月14日, 9月6日) では, 底泥表層付近に酸化的層から還元的層に遷移する RPD 層が形成され, 脱窒菌数は春季と比較して全体的に増加するが, 特に, RPD 層付近で $1.8 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$ cells/g-DW と急増した. 冬季 (11月16日, 12月1日) における底泥は, 全体的に酸化的状態となり, 夏季と比較して脱窒菌数は $3.4 \times$

$10^2 \sim 4.3 \times 10^3$ cells/g-DW と減少し、春季と同様全層にわたり一様な分布傾向を示した。また、夏季に大きく脱窒菌数が減少した8月19日における底泥は、全体的に酸化層になっており、菌数は夏季（7月14日、9月6日）のその1/10程度となった。これは、8月17日～18日に有明海に接近した台風10号の影響により海底が激しく攪拌され、巻き上げられた底泥が調査区域に広く堆積したために、底泥環境が酸化状態となり脱窒菌数が大きく減少したものと推察される。8月19日以降の夏季における底泥環境は、還元的環境への移行、さらにはRPD層の形成により、表層付近で再び脱窒菌数は増加した。

これらの結果より、調査区域における底泥の酸化還元環境の鉛直構造は季節的に大きく変動し、脱窒菌数は、特に底泥表層を中心としたRPD層形成の有無にかなり敏感に変動するものと考えられる。

なお、0～2cm層の脱窒菌数の年平均値は、 1.74×10^4 cells/g-DWで、8～10cm層のそれより約10倍高く、相崎⁶⁾が霞ヶ浦を対象にMPN法より計数した底泥0～2cm層の菌数($2.6 \times 10^3 \sim 6.5 \times 10^4$ cells/g-DW)と同程度の値であった。

(3) 泥質干潟における底泥間隙水中の無機態窒素濃度の季節変化

図-7は、2006年4月～12月の佐賀県東与賀海岸における底泥間隙水中の NH_4^+-N 、 NO_3^--N 及び NO_2^--N の経時変化を表したものである。ここで、無機態窒素濃度の値は、底泥全層（0～2cm, 2～4cm, 4～6cm, 6～8cm, 8～10cm）の濃度を平均した値である。図示されるように、無機態窒素濃度には顕著な季節変化が見られた。すなわち、 NH_4^+-N は夏季（7～8月）に約6.39mg/Lまで増加し、冬季（11～12月）に約1.59mg/Lまで減少した。一方、 NO_3^--N 及び NO_2^--N は、春季（4月）に約0.035mg/Lと高いが、夏季（7～8月）にそれぞれ約0.002mg/L, 0.008mg/Lまで減少し、逆に冬季（11～12月）ではそれぞれ約0.008mg/L, 0.018mg/Lまで増加した。

NH_4^+-N の季節変化には、底泥内のバクテリア等による有機物の分解が密接に関連しているものと考えられる。図-8は、2006年4月～12月における底泥全層のC/N比の平均値と泥温を表したものである。図示されるように、夏季から晩秋にかけてC/N比は9.2から7.6まで減少し、晩秋から冬季にかけて7.6から8.7まで増加する季節変動を示した。このことから、夏季では泥温の上昇に伴い底泥内の有機物の分解が促進されたために NH_4^+-N が増加し、逆に冬季では泥温の低下に伴い底泥有機物の分解が抑制されたために NH_4^+-N が減少したものと推察される。

また、 NO_3^--N 及び NO_2^--N の季節変化には、脱窒菌数の季節変化に伴う脱窒活性の大小が大きく寄

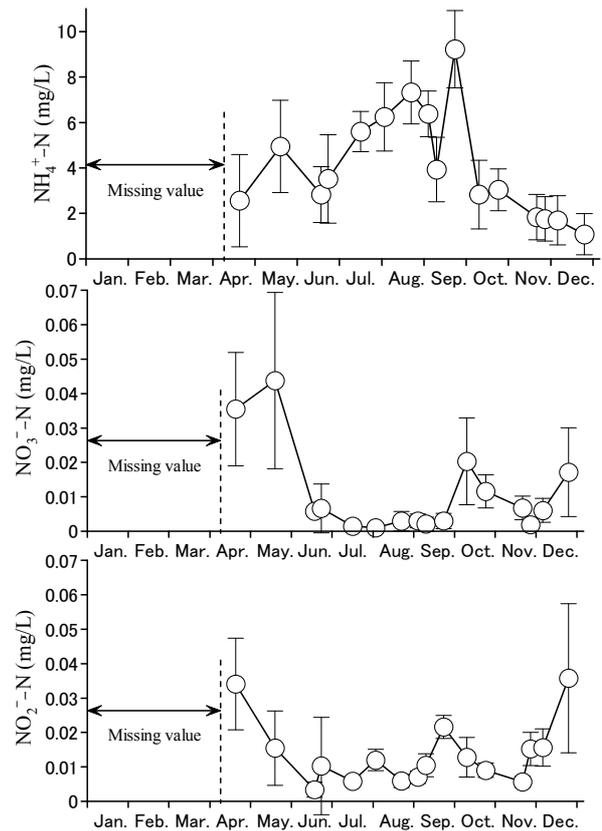


図-7 東与賀海岸（泥質干潟）における底泥間隙水中の無機態窒素濃度の季節変化

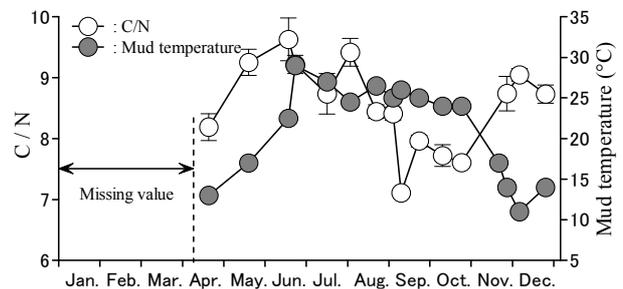


図-8 底泥C/N比と泥温の季節変化

与しているものと考えられる。すなわち、夏季では底泥表層付近の脱窒菌数が急増し、底泥中の脱窒活性が上昇するために、底泥表層では硝化と脱窒が効率的に行われ、 NO_3^--N 及び NO_2^--N が減少したものと考えられる。一方、春季及び冬季では、脱窒菌数が減少し、底泥中の脱窒活性が低下するために、底泥表層では硝化過程や海水により供給された NO_3^--N 及び NO_2^--N が蓄積し増加したものと推察される。黒田⁷⁾は、スラリー法を用いて泥質の藤前干潟における底泥層別の脱窒速度を測定した結果、脱窒活性は表層付近に限定されると報告している。本調査区域においても、底泥0～2cm層の脱窒菌数は底泥8～10cmのそれより年間を通して約10倍高く、特に脱窒菌数は夏季に底泥表層付近で著しく増加することから、脱窒活性は表層付近で最も高いものと推察される。

(4) 底泥からの脱窒速度及び無機態窒素溶出速度

図-9は、2006年夏季(6~8月)と冬季(11~12月)における NH_4^+ 及び NO_3^- の溶出速度を比較したものである。図示されるように、夏季と冬季において NH_4^+ 溶出速度には大きな差異が見られた。夏季での NH_4^+ 溶出速度は、4.59~270.03(平均108.98) $\text{mg}/\text{m}^2\text{day}$ であるのに対して、冬季では-12.16~-38.34(平均-28.05) $\text{mg}/\text{m}^2\text{day}$ であった。すなわち、夏季では底泥から直上水への NH_4^+ 溶出が、逆に冬季では直上水から底泥への NH_4^+ 取り込みが見られた。一般に泥質干潟では、砂質干潟のような干満に伴う海水の浸透・排出は少なく、底泥-直上水間の物質移動は基本的に濃度勾配に基づく鉛直拡散に依存するものと考えられる。したがって、夏季・冬季における NH_4^+ 溶出速度の差異は、底泥表層付近における間隙水中 NH_4^+ 濃度の季節変動に大きく左右されるものと推察される。なお、溶出実験後に底泥試料内のマクロベントス調査を行った結果、マクロベントスの現存量は平均湿重量0.15 kg/m^3 と少なかったことから、本実験においてマクロベントスの生物活動による NH_4^+ 溶出への影響は小さいものと考えられる。

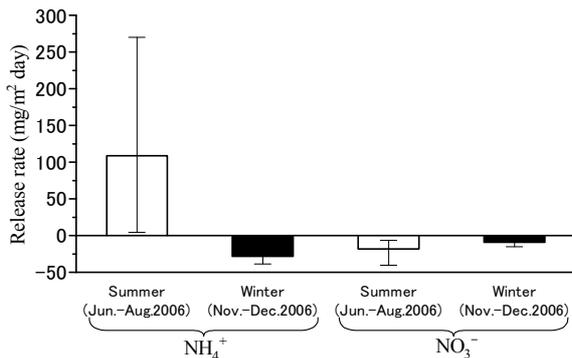


図-9 夏季と冬季における NH_4^+ 及び NO_3^- の溶出速度

一方、夏季及び冬季における NO_3^- の溶出速度は、それぞれ-6.56~-40.43(平均-18.24) $\text{mg}/\text{m}^2\text{day}$ 、-4.07~-15.31(平均-9.37) $\text{mg}/\text{m}^2\text{day}$ となり、夏季・冬季共に直上水から底泥への NO_3^- の取り込みが見られた。ここで、夏季及び冬季に底泥に取り込まれた NO_3^- -Nは、それぞれ平均4.12, 2.12 $\text{mg-N}/\text{m}^2\text{day}$ となった。アセチレン阻害法により得られた脱窒速度は、夏季で約7.00 $\text{mg-N}/\text{m}^2\text{day}$ 、冬季で約0.87 $\text{mg-N}/\text{m}^2\text{day}$ であった。このことから、夏季においては、泥温の上昇や脱窒菌数の急増により、干潟底泥表層付近で脱窒活性が高まるために、直上水からの取り込みや硝化過程より生成された NO_3^- -Nの大部分は脱窒により系外に放出される。しかし、冬季においては、泥温の低下や脱窒菌数の減少のために、干潟底泥内の脱窒活性が低下し、その結果、取り込まれた NO_3^- -Nの41.0%程度が除去されるものと推察される。

4. まとめ

本研究で得られた知見は、次のように要約される。

- (1) 有明海奥部沿岸域における広域的な脱窒菌の分布状況が把握され、脱窒菌数と含泥率には有意な正の相関性が見られた。また、底質特性の違いによる干潟表層内の酸化還元環境の変化は、脱窒菌数の季節変動に大きく影響するものと推察された。
- (2) 泥質干潟域底泥における脱窒菌数及びEhの鉛直分布の季節変化が明らかにされ、特に脱窒菌数は底泥表層付近に形成されるRPD層の有無に敏感に変動するものと考えられた。
- (3) 泥質干潟における底泥間隙水中の無機態窒素の季節変化が明らかにされた。すなわち、 NH_4^+ はC/N比に対応し、夏季では泥温の上昇に伴う底泥有機物分解の促進のために増加し、冬季では泥温の低下に伴う有機物分解の抑制のため低下するものと考えられた。一方、 NO_3^- 及び NO_2^- は、脱窒菌数の変動に伴う脱窒活性の季節変化を反映し、春季・冬季で増加し、夏季で減少した。

参考文献

- 1) 佐々木克之, 程木義邦, 村上哲生: 諫早湾調整池からのCOD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定, 海の研究, 12(6), pp. 573-591, 2003.
- 2) 中村由行: 干潟の生態系と水質浄化について, 波となぎさ, 150, pp. 40, 2001.
- 3) 土壤微生物研究会: 土壤微生物実験法実験法, p. 45-p. 52, 養賢堂, 1997.
- 4) Chan, Y.K. and Knowles, R: Measurement of denitrification in two freshwater sediments by an in situ acetylene inhibition method, *Appl. Environ. Microbiol.*, 37, pp. 1067-1072, 1979.
- 5) 金道熙, 山本民次, 松田治: 広島湾底泥からの無機態窒素溶出フラックスの見積もり, 生物生産学研究, 34, pp. 185-190, 1995.
- 6) 相崎守弘, 中島拓男: 細菌分布から見た霞ヶ浦の物質代謝の特徴, 国立公害研究所報告, 22, pp. 63-87, 1981.
- 7) 黒田伸郎: 干潟の脱窒速度の測定について, 愛知水試研報告, 4, pp. 49-56, 1977.

(2007. 3. 19 受付)

廃材炭化物および植物の利用による クリークの水質負荷削減

REDUCTION OF WATER QUALITY LOADS IN CREEK USING CARBONIZED WASTES AND PLANTS

原口智和¹・加藤 治²・瀬口昌洋²・郡山益実¹

Tomokazu HARAGUCHI, Osamu KATO, Masahiro SEGUCHI, Masumi KOORIYAMA

¹農博 佐賀大学助手 農学部生物生産学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農博 佐賀大学教授 農学部生物生産学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Two types of experiment were conducted for the reduction of water quality loads in creek. Carbonized matter of dead pine-needles and water hyacinth were soaked in pure water to remove resoluble matter. Inorganic nitrogen and phosphorous phosphate were both reduced by pine-needles carbonized at 900°C. For water hyacinth carbonized at 900°C, much phosphorous phosphate was reduced than pine-needles, while reduction of inorganic nitrogen did not occurred due to dissolution. For the purification by using plants, the significant reduction in total nitrogen and total phosphate was observed for sugarcane. Potential to suck nutrition of ice-plant was accelerated twice by adding salt to creek water.

Key Words : Purification of creek water, carbonized matter, pine-needle, water hyacinth, ice-plant, sugarcane

1. はじめに

有明海沿岸農業地帯では、施肥量の増加や生活系負荷の増大により、クリークに排出される負荷が増加している。また、クリーク水域の滞留性のため有機性汚濁や富栄養化が顕在化し、負荷の蓄積による水質悪化が問題となっている。このことを踏まえ、高度な生産性を維持しつつ、農業地帯からの排出負荷を削減すると同時に水質環境の保全を図ることが重要な課題である。

一方、佐賀県内では、植物廃材の処理対策も課題となっている。同県北西部海岸に延びる虹ノ松原（面積240ha）では、他の松原と同様、落ち葉の堆積が問題となっている。また、一部のクリークではホテイアオイが繁茂しているが、農業や漁業（ノリ養殖業）に悪影響を及ぼすため、除去が必要となっている。

有明海沿岸域の農業地帯で行われている農地排水の循環・反復利用による物質循環の条件を踏まえ、クリークを活用した排出負荷対策の技術を開発する。ここでは、松落ち葉およびホテイアオイの炭化物の水質浄化機能、ならびに植物の養分吸収を利用した栄養塩の除去技術について検討した。

2. 廃材炭化物の水質浄化機能

(1) 炭化物の製造方法と比表面積

佐賀県虹ノ松原より採集した松落ち葉および佐賀大学構内で採取したホテイアオイを炭材として、電気炉で炭化した。以後、松落ち葉およびホテイアオイの炭化物を、それぞれ松葉炭とホテイアオイ炭と呼ぶ。炭化温度による特性の違いを調べるため、400、600、900°Cの3段階を設定した。佐賀県工業技術センターにて、これら6種類（炭材2種類×炭化温度3段階）の炭化物の比表面積を測

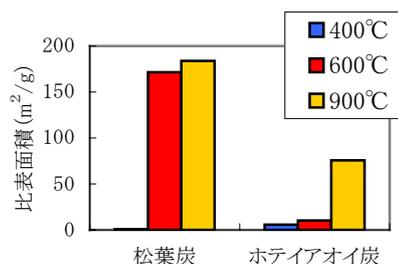
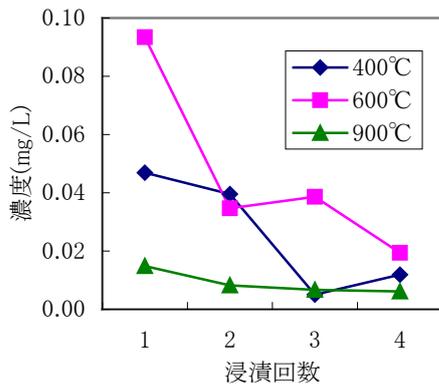
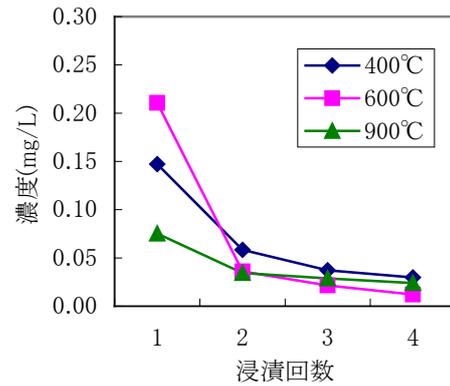


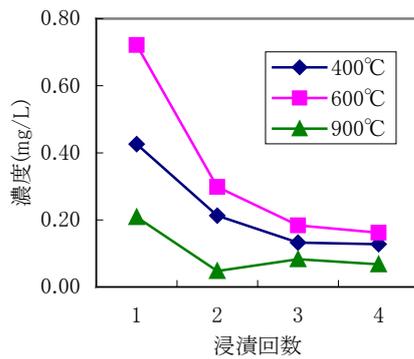
図-1 炭化物の比表面積。



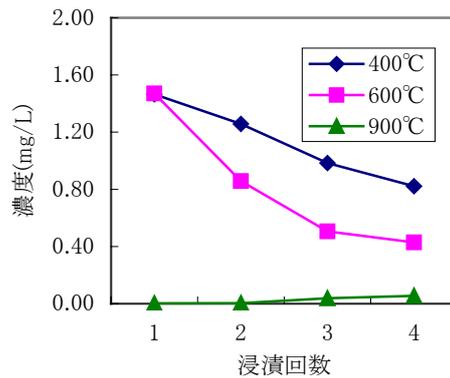
松葉炭



松葉炭



ホテイアオイ炭



ホテイアオイ炭

図-2 炭化物からの無機態窒素の溶出。

図-3 炭化物からのリン酸態リンの溶出。

表-1 溶解性成分の溶出量

	炭化温度 (°C)	溶出量(mg/g)					
		無機態-N	リン酸態-P	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
松葉炭	400	0.016	0.041	1.41	1.11	0.11	0.45
	600	0.028	0.042	1.49	1.76	0.03	0.26
	900	0.005	0.024	1.78	3.14	0.05	1.31
ホテイアオイ炭	400	0.135	0.679	6.26	76.80	2.50	1.25
	600	0.205	0.489	8.60	56.92	1.33	0.80
	900	0.061	0.015	5.62	87.84	0.59	5.10

定した(図-1)。どちらの炭化物も炭化温度の上昇に伴い比表面積も増加した。松葉炭では炭化温度が400°Cから600°Cに上昇することによって、比表面積は約200倍増加した。

(2) 成分溶出に関する実験

a) 実験方法

各炭化物2gをそれぞれ蒸留水300mlの入ったガラスビーカーに入れて軽く攪拌させた後、30°Cに設定した恒温器に静置した。24時間後に採水し電気伝導度とpHを測定し、水を入れ替えた。これを電気伝導度の変化が小さくなるまで繰り返した。採水した試料の各種栄養塩濃度、全窒素、全リン濃度、陽イオン(Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)濃度を分析し、各成分の溶出量を算定した。

b) 実験結果

図-2に24時間浸漬後の無機態(硝酸態、亜硝酸態、ア

ンモニア態)窒素濃度を示す。両炭化物とも、浸漬回数が増えるに連れて濃度は低下し、炭化温度900°Cのものが最も総溶出量が少なかった。

図-3に24時間浸漬後のリン酸態リン濃度を示す。炭化温度900°Cのホテイアオイ炭を除き、浸漬回数が増えるに連れて濃度は低下した。また、どちらの炭化物とも、炭化温度900°Cのものが最も総溶出量が少なかった。

表-1に単位質量(1g)の炭化物から溶出した成分の、4回浸漬の総量を示した。どの成分についても、ホテイアオイ炭からの溶出量は、松葉炭からのものより10倍以上大きいことが分かる。また、どちらの炭化物においても、無機態窒素、リン酸態リンについては炭化温度900°Cのものが最小となったが、他の陽イオンについては、炭化温度による明確な違いは見られなかった。

(3) 吸着に関する実験

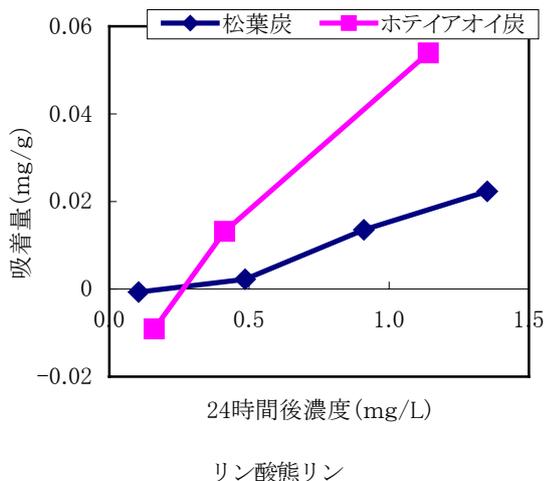
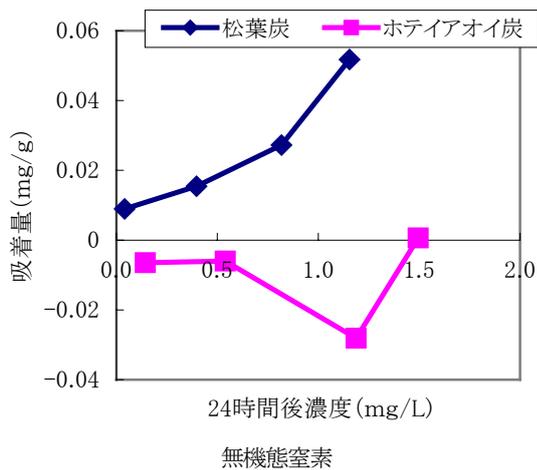


図-4 炭化物の吸着特性.

a) 実験方法

比表面積が大きく無機態窒素とリン酸態リンの溶出の比較的少ない炭化温度900℃の松葉炭とホテイアオイ炭を用いて実験を行った。まず、溶解性成分をできるだけ取り除くため、炭化物を蒸留水に4回浸漬した。そして、それら前処理した炭化物を、4段階の濃度 (0.1, 0.5, 1.0, 1.5mg/L) の硝酸カリウム水溶液またはリン酸カリウム水溶液300mlを入れたガラスビーカーに入れ、30℃の恒温器に24時間静置した後採水した。採水した試料の各種栄養塩濃度、全窒素、全リン濃度を分析した。

b) 実験結果

図-4に無機態窒素およびリン酸態リンの吸着量 (炭化物単位質量あたり) の関係を示す。吸着量は、各成分の初期濃度と浸漬24時間後の濃度の変化より算出した。無機態窒素については、松葉炭では全ての初期濃度に対して吸着が見られたが、ホテイアオイ炭では溶出が続いたため吸着量がマイナスとなった。リン酸態リンについては、松葉炭では全ての初期濃度に対して吸着が見られ、ホテイアオイ炭でも初期濃度0.1mg/Lの場合を除き吸着が見られた。また、リン酸態リンの吸着量はホテイアオイ炭のほうが松葉炭より大きかった。

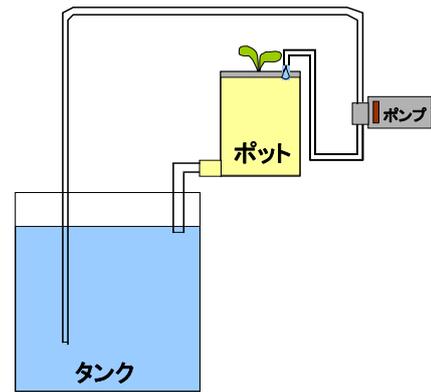


図-5 植物を用いた浄化に関する実験の概観.

3. 植物による浄化

(1) 実験方法

植物1株を植えた1/5000アールのワグネルポットに、ポリタンクに入れた試料水をマイクロチューブポンプを用いて一定流量で循環させ、タンク内の水質の時間変化を調べた (図-5)。供試植物には、バイオマス生産力の高いサトウキビと好塩性のアイスプラントの2種類を用いた。サトウキビを用いた実験では、植物個体の大きさおよび流量の違い (108ml/hと216ml/h) による水質浄化への影響を、アイスプラントを用いた実験では、塩化ナトリウム添加量の違いによる除去量への影響を調べた。

栽培土壌には透水性が高く吸着性の低い砂を用いた。土壌面蒸発による試料水の濃縮を抑えるためにポットの表面をアルミホイルで覆った。植物は移植後1ヶ月以上経過し十分に活着したものを用いた。採水は1週間に数回行い、pH、EC、COD、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、T-N、T-Pについて分析を行った。

気象条件については、日射量と温湿度を測定した。また、採水前にポット及びタンクの重量を測定し、蒸散量を求めた。

(2) 実験結果

図-6にサトウキビを用いた実験における、全窒素および全リンの除去率の変化を示す。除去率は、あるサンプリングから次のサンプリングまでの間の、タンク内物質量的変化から次式により計算した。

$$\text{除去率}(\%) = (\text{物質量}(t_0) - \text{物質量}(t_1)) / \text{物質量}(t_0) \times 100 \quad (1)$$

全窒素の除去率は、生長の小さい実験初期の期間 (開始から9日目) で0~20%であり、それ以降は生長の進行に伴って増加した。実験開始9日目以降では、作物個体の大きい方が小さい個体より2倍程度除去率が大きかった。全リンについては、13日目ごろまでは全ての個体で除去率が20~70%と高いが、それ以降は除去率が低下するものが現れ、マイナス (リンの増加) となるものもあった。

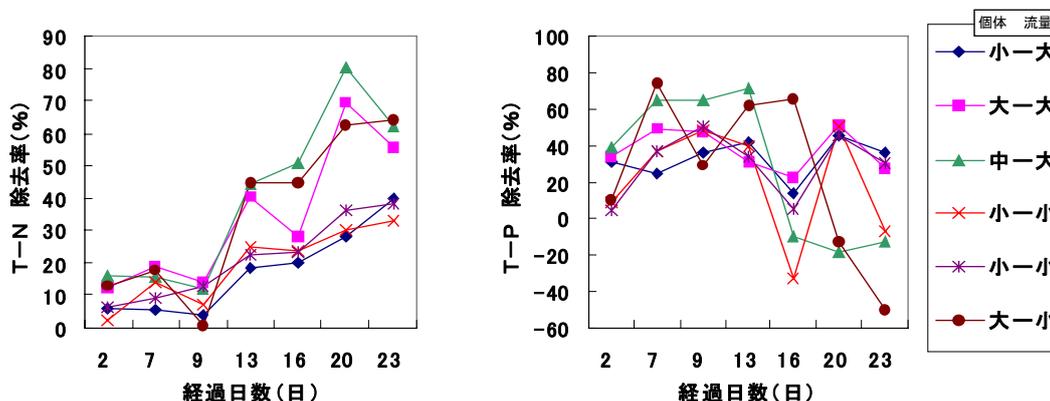


図-6 サトウキビを用いた浄化実験における全窒素・全リン除去率の変化。

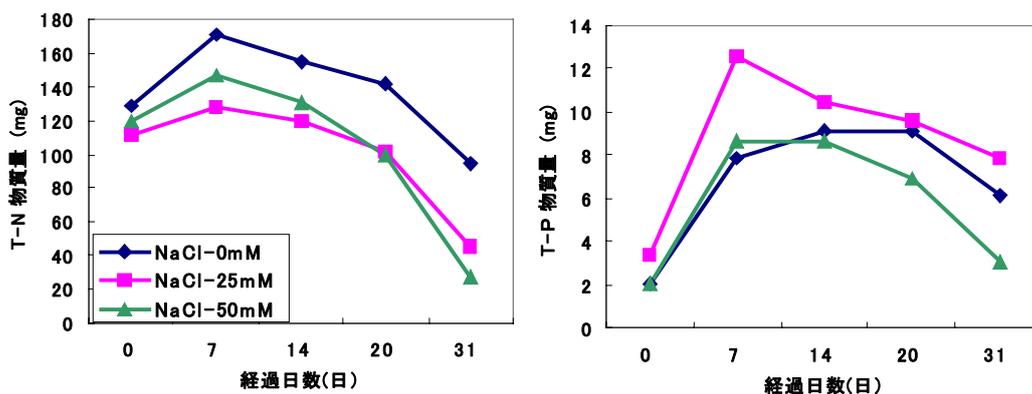


図-7 アイスプラントを用いた浄化実験におけるタンク内の全窒素・全リン質量の変化。

実験期間全体での全窒素の除去率は平均が85%であり、大きい個体の方が小さいものより20%ほど大きく、全リンに関しては、平均が92%で、個体の大きさによる差は確認されなかった。なお、通水流量の違いによる全窒素・全リン除去への影響は無かった。

図-7にアイスプラントを用いた実験における、貯水タンク内の全窒素と全リンの量の変化を示す。実験開始当初はポットに施した肥料の成分が溶出したため、7日目の物質量は0日目よりも全窒素、全リンともに増加した。その後は肥料成分の溶出量よりも植物による吸収量のほうが大きくなったため、タンク内の物質量は全窒素、全リンともに減少した。7日目から実験終了までの24日間における、NaCl無添加の個体での全窒素および全リンの除去率は40%と30%であり、NaCl濃度が50mMの個体ではそれらの約2倍まで除去率が增大した。

4. おわりに

炭化物を利用したクリーク水の負荷削減に関する研究では、松葉及びホテイアオイを3段階の温度で炭化させ、材料と炭化温度の違いによる溶出特性を調べた。その結

果、両材料とも炭化温度が上昇するにつれ水への成分の溶出量が小さくなる傾向が見られた。また、硝酸カリウム水溶液とリン酸カリウム水溶液を用いて、無機態の窒素とリンに対する吸着特性を調べたところ、松葉炭については水溶液の濃度の上昇に伴って窒素とリンの吸着除去量は増加し、ホテイアオイ炭では窒素成分の溶出が続き、リンの除去量は松葉炭よりも大きかった。

植物利用による水質負荷削減に関する研究では、サトウキビとアイスプラントを用いて、それらの生育が旺盛な条件において窒素とリンの吸収除去量を調べた。その結果、サトウキビでは23日間での全窒素と全リンの除去率はそれぞれ85%と92%と高く、アイスプラントでは24日間での全窒素・全リンの除去率はそれぞれ40%と30%であった。また、好塩性であるアイスプラントは、NaClを加えることにより、それらの除去率は2倍に増大した。

謝辞：植物によるクリーク水の浄化に関する研究では、佐賀大学農学部熱帯作物改良学分野より、供試作物の提供と栽培方法についてのご助言をいただきました。ここに記して心より感謝の意を表します。

(2007. 3. 19受付)

環境モデル研究部門

Research Division of ENVIRONMENTAL MODELING

有明海奥部における物質輸送と 低次生態系の動態について – 2年目の成果 –

MASS TRANSPORT AND ECOSYSTEM DYNAMICS IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA -RESULTS OF THE 2nd YEAR-

速水祐一¹・槻木(加)玲美²・濱田孝治³・山本浩一³・吉野健児⁴
大串浩一郎⁵・平川隆一⁶・宮坂仁⁷・大森浩二⁸

Yuichi HAYAMI, Narumi TSUGEKI-KUWAE, Takaharu HAMADA, Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Koichiro OHGUSHI, Ryuichi HIRAKAWA, Hitoshi MIYASAKA and Koji OMORI

¹農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²理博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴水博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁵工博 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁶工博 佐賀大学助手 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁷理博 愛媛大学COE研究員 沿岸環境科学研究センター (〒790-8577 松山市文京町2-5)

⁸理博 愛媛大学助教授 沿岸環境科学研究センター (〒790-8577 松山市文京町2-5)

In order to investigate the reasons for the increase of red tide in the inner area of the Ariake Sea, we analyzed the long term monitoring data taken by the Saga Prefectural Ariake Fisheries Research and Development Center. The increase of the bloom days mainly occurred in autumn and winter when diatoms were the most abundant red tide phytoplankton. The variation of plankton settling volume in these seasons negatively correlated to the bivalve catch and positively correlated to transparency and DIN. The transparency was increased and bivalve catch was decreased in these 20 years. Thus the red tide increase would be caused by the enhanced production of phytoplankton generated by the increase of light availability and decrease of grazing pressure by bivalves. The reason for the increase of transparency was also investigated. The variation in SS concentration could be estimated from transparency. The estimated SS concentration was correlated to the surface turbidity ratio between stations in the river mouth and offshore mudflat area of the Chikugo River. It suggests that the decrease of horizontal diffusion or increase of the net deposition flux of sediment in this area would generate the increase of transparency in the offshore water.

Key Words : red tide, phytoplankton, transparency, grazing, bivalve, long term variation, SS

1. はじめに

有明海の問題、いわゆる「有明海異変」が注目されるようになったのは、2000年度に起きた養殖ノリの大規模色落ち被害がきっかけで、その背景には干拓のための諫早湾締め切りがある。2007年は、ノリの大規模色落ちから6年、諫早湾締め切りからは10年になる。ノリの大規模色落ちを契機に、2002年には「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律（有明海特措法）」が成立し、それにもとづいて多くの調査研究がお

こなわれてきた。2007年にはこの法律の見直しもおこなわれる。図-1は日本海洋学会大会における有明海関連の研究発表件数の変遷である。この図から2つのことがわかる。1つは、2001年春以前はほとんど有明海に関する発表はなく、この海が極めて研究されることが少ない水域であったことである。もう1つは、2001年秋以降、有明海に関する研究発表は急激に増えたものの、2005年頃を境に、我々の発表を除くと発表件数は減少に転じたことである。これは、有明海研究が既に「旬」を過ぎ、再びかつてのように研究対象として注目されることが少ない海に戻りつつあることを示唆する。しかし現実の問題を

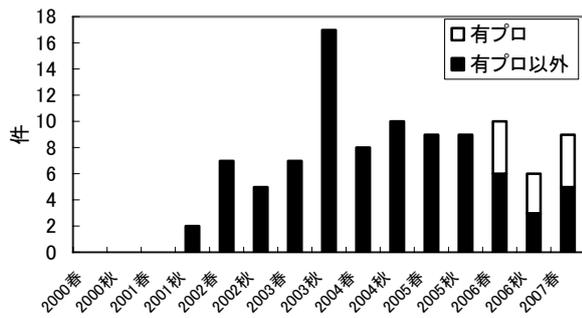


図-1 日本海洋学会大会における有明海関係発表件数。

振り返ってみると、「異変」の原因はまだ究明されておらず、根本的な再生策に至っては全く見通しが得られていない。このような状況にあるため、最近ではなかなか問題の解決に結びつかない学術研究の現状に対して、批判的な意見さえ聞かれる。有明海の研究においては、しばしば基礎研究の重要性が強調される。しかし、現状を鑑みると、なによりもまず「異変」が生じるにいたった具体的なシナリオと根本的な再生策の提示をできる限り早くおこなうことが重要である。

「有明海異変」の原因解明が進まない理由として、しばしば海の生態系が多く要素を含んだ複雑系であることが挙げられる。しかし、海洋学はこのような複雑系を相手に100年以上にわたって技術と知見を蓄積してきた。また、過去に有明海の研究が少なかったとはいえ、沿岸各県水産機関の地道な努力などにより、かなりのモニタリングデータが蓄積されている。さらに、諫早湾締切以降の10年間には、各機関によって精力的な調査研究がおこなわれ、多くの研究結果が発表されている。こうした海洋学的な技術・知見と、データを生かし、他の海域との比較をおこなえば、問題が発生した仕組みの大きな枠組みを明らかにすることは充分可能ではないだろうか。

そこで、我々の研究グループでは、以下のような戦略で研究を進めている。0) まず、主な研究対象水域を有明海奥部に絞る。1) データ解析と実験によって、この海域における「異変」発生機構の大枠をつかむ。2) 有明海奥部の低次生態系変動を再現できる数値生態系モデルを構築する。3) 1の結果から導き出される「異変」発生機構に関する仮説を、2のモデルを使って検証する。4) 具体的な再生策を提示し、その実効性をモデルで検討する。現時点では、1の「異変」発生機構の大枠をつかむと共に、2のモデルの構築、およびモデル化に必要なパラメータや各種条件、検証データセットを得るための作業を進めている。研究推進にあたっては、他の海域と比較するという視点を絶えずもちながら進めている。また、他の海域と比べた有明海の特徴、および「有明海異変」に含まれる問題の相互関係から、懸濁物質の動態を明らかにすることが問題解決のための重要なポイントであると考えている¹⁾。

本稿では、有明海奥部における「異変」の原因について

物質輸送と低次生態系動態の面から検討を加えた結果を報告する。表-1に「有明海異変」に含まれる問題の一覧を示した。本報告で重点をおいた問題は表-1の1, 2である。5, 6については本報告集の別の稿で報告する²⁾。7については1との関係で本稿の考察で触れる。

表-1 有明海異変に含まれる問題

- 1) 赤潮の増加
- 2) 透明度上昇
- 3) 底質の細粒化
- 4) 貝類漁獲量の減少
- 5) 貧酸素水塊の発生
- 6) CODの上昇
- 7) ノリの生産不安定
- 8) 底魚を中心にした魚類漁獲量減少

2. 赤潮について

(1) 背景と目的

有明海では、毎年のように秋季～冬季にケイ藻赤潮が発生する³⁾。秋季～冬季の赤潮は養殖ノリの色落ち被害を引き起こすため、大きな問題である⁴⁾。夏季にはしばしばシャトネラなどの有毒プランクトンによる赤潮が発生し、貝類の斃死などの被害を与える⁵⁾。また、大量に増殖した赤潮プランクトンが底層に沈降、死亡して分解されることが貧酸素水塊の発達を助長している可能性も指摘されている⁶⁾。こうした赤潮の発生件数は近年増加しており⁷⁾、「有明海異変」に含まれる主要な問題の1つに挙げられている。しかし、赤潮増加の原因については現在まで解明されておらず、その発生実態について報告した例も少ない。また、有明海の中でも海域によって環境特質は大きく異なっており、非常に透明度が低く、河川水の影響を強く受ける湾奥部は他の海域とは異なった特性を有している。そこで本研究は、有明海湾奥の佐賀県海域を対象に、赤潮発生状況データを整理・解析し、長期的な赤潮発生状況の変化を示した。さらに、植物プランクトンの生産に関わる環境因子の長期変化について解析し、赤潮増加の原因について検討した。

(2) 資料

解析には、有明海佐賀県海域における、赤潮データ、浅海定線調査データ、貝類の漁獲データをもちいた。赤潮データは、水産庁九州漁業調整事務所がまとめた九州海域の赤潮発生状況データのうち、有明海・八代海で発生した赤潮について日本水産資源保護協会がまとめたもの⁸⁾で、そのうち佐賀県海域のものだけを選んだ。データ期間は1985年度～2002年度である。浅海定線調査データは、佐賀県有明水産振興センターによって、図-2の11定点で得られたものである。用いたデータの期間は

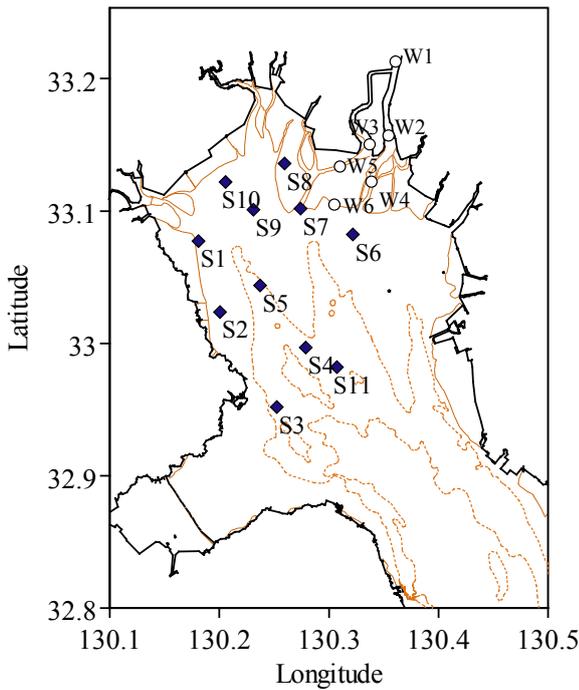


図-2 佐賀県浅海定線観測点(◆)および水資源機構筑後大堰関連水質調査観測点(○)。

1972年度～2005年度である。ただし、プランクトン沈殿量については1975年度以降しかない。貝類の漁獲データは、佐賀農林水産統計年報¹⁰⁾記載の漁業種類別魚種別漁獲量データのうち、貝類の漁獲量だけをまとめたものである。これは、日本水産資源保護協会がまとめたデータセット⁹⁾に、近年の分は佐賀農林水産統計年報から補って用いた。データ期間は1975年～2003年である。データ整理にあたっては、透明度については武岡¹¹⁾にしたがって調和平均した値を用いたが、それ以外は算術平均を用いた。成層強度を求めるにあたっては、表層と5mの密度差を水深で割った値を用いた。ただし、水深が10m未満で浅いために5mのデータがない場合は、5mの代わりに底上1mのデータをもちいた。データ上で密度逆転が生じている場合は、成層強度を0とした。

(3) 赤潮の経年変動

年度毎の全赤潮の継続日数合計(年間赤潮発生日数)を求めたところ、1985年から2002年の間で有意($p < 0.05$)な増加傾向を示した(図-3)。季節による違いを調べるために、1年を春季(4～6月)、夏季(7～9月)、秋季(10～12月)、冬季(1～3月)に分け、毎月の赤潮発生日数の季節毎の平均を求めた。これを1985～1990年、1991～1996年、1997～2002年の各6年ずつについて平均して比較したところ、夏季の赤潮発生日数には変化がないのに対し、秋季、冬季に著しい赤潮発生日数の増加があった(図-4)。次に、卓越種の種類にもとづいて赤潮をケイ藻赤潮、ラフィド藻赤潮、渦鞭毛藻赤潮、その他赤潮の4種類に分け、それぞれの発生日数の変化を調べ

た。年度毎の赤潮発生日数を種類別に求め、それを1985～1990年、1991～1996年、1997～2002年の各6年ずつについて平均した結果を図-5に示す。いずれの6年間についても最も多かったのはケイ藻赤潮であり、年間赤潮発生日数の50%以上を占めた。ケイ藻赤潮は、発生日数でも、年間赤潮発生日数に占める割合でも3つの期間を通して増加傾向にあった。ケイ藻赤潮の多くは秋～冬季に発生していた。種としては*Skeletonema costatum*が第1優占種になることがもっとも多く、他に*Chaetoceros sociale*あるいは*Chaetoceros sp.*といった小型ケイ藻が優占するが多かった。ラフィド藻赤潮は、平均すると年間赤潮発生日数の15%を占めるに過ぎなかったが、発生日数でも、年間赤潮発生日数に占める割合でも、3

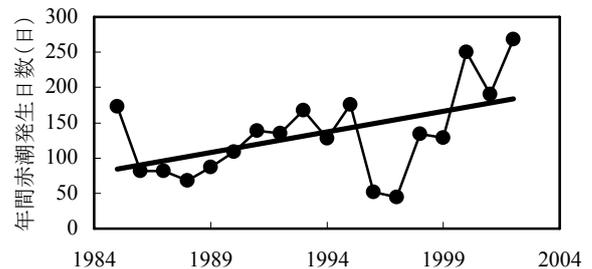


図-3 有明海佐賀県海域における年間赤潮発生日数の推移。

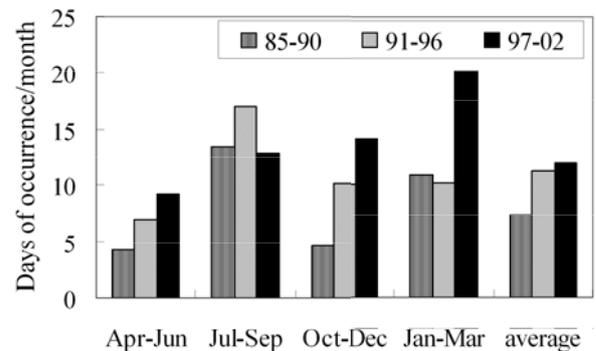


図-4 季節別に見た赤潮発生日数。1985～90年、91～96年、97～02年の各期間平均。

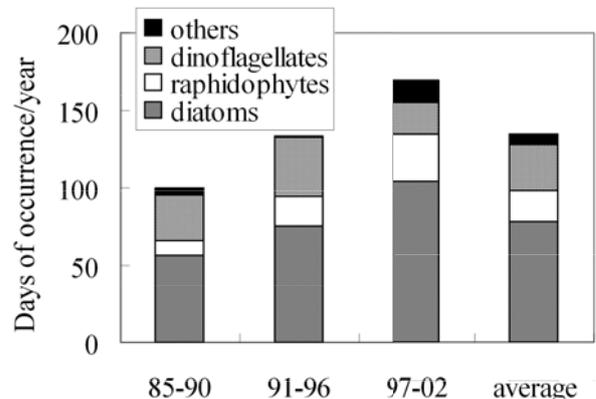


図-5 分類群別に見た年間赤潮発生日数の推移。

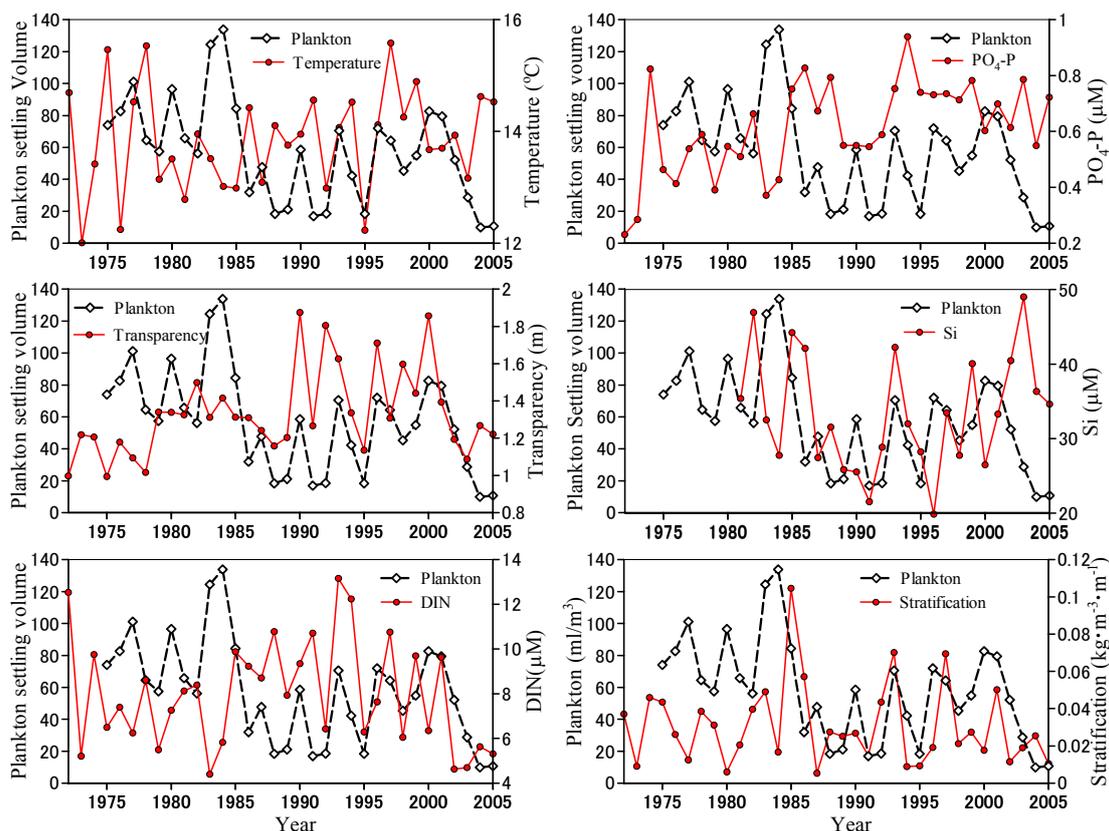


図-6 秋冬季の表層水温，透明度，表層栄養塩濃度（ $PO_4\text{-P}$ ， DIN ， Si ），成層強度と，プランクトン沈殿量の経年変動。

つの期間を通して増加傾向にあった。1985年から1990年までの平均では、ラフィド藻赤潮の発生日数は10日/年で、年間赤潮日数の10%を占めるに過ぎなかった。しかし、1997年以降の6年間になると、ラフィド藻赤潮の発生日数は31日/年になり、年間赤潮日数のうち18%まで増加した。ラフィド藻赤潮の増加は主に夏，秋に起きており、8，9月に発生したものは*Chattonella antiqua*ないし*Chattonella spp.*によるもので、10，11月に発生したものは*Fibrocapsa Japonica*によるものであった。渦鞭毛藻赤潮は、平均するとケイ藻赤潮に次いで発生日数が多く、年間赤潮発生日数のうち22%を占めた。しかし、ケイ藻赤潮、ラフィド藻赤潮と異なって増加傾向にはなく、年間赤潮発生日数に占める割合で見ると、3つの期間を通して減少傾向にあった。その他の赤潮は相対的に少なく、平均すると年間赤潮発生日数のうち5%を占めるに過ぎなかった。以上の結果は、有明海佐賀県海域における赤潮増加の主体はケイ藻とラフィド藻であり、発生日数でもその増加日数でもケイ藻赤潮がもっとも多くを占めることを示している。このようなケイ藻赤潮は秋～冬季に多発する。

(4) 赤潮増加の原因について

前節で述べたように、有明海奥部の赤潮増加は主に秋～冬季のケイ藻赤潮の増加によっていた。そこで、この期間を対象として、赤潮増加の原因について検討した。植物プランクトンの増殖には、光，栄養塩，温度，成層

強度が影響する。そこで、年度毎に平均した秋冬季のプランクトン沈殿量と透明度，表層の成層強度，表層0mの水温，栄養塩濃度を比較した。用いた資料は佐賀県浅海定線調査データである。赤潮発生日数の代わりにプランクトン沈殿量を用いたのは以下の理由による。赤潮データについては同時に測定された水質データがない。有明海では、大潮小潮周期に代表される数日～2週間スケールの環境変動が大きく、同じ季節・月であっても異なる時期に測定されたデータは比較に使いにくい。例えば、冬季の植物プランクトン濃度は大潮小潮周期で変動する¹²⁾。したがって、水質データと比較するためには、赤潮データの代わりに浅海定線調査によって水質と同時に測定されているプランクトン沈殿量を用いる方が適している。プランクトン沈殿量は、表層2mについて目合100 μm のネットを鉛直引きして得られたサンプルを固定後、沈殿管に移して24時間静置後に定量した結果である。冬季のプランクトン沈殿量はケイ藻の細胞数と良い相関があることがわかっている¹³⁾。図-6にプランクトン沈殿量と、水温，透明度，栄養塩濃度，成層強度の経年変動を合わせて示した。いずれも有明海佐賀県海域の全11測点の10～3月の平均値である。プランクトン沈殿量は、1984年以前は比較的高い値で変動していたが、1985年から89年にかけて急減し、その後再び増加に転じた。水温は年々の変動が大きいものの全体としては上昇傾向にあった。プランクトン沈殿量との間には明確な対応は見られなかった。透明度は上昇傾向が顕著であり、1970年代には

1. 2m以上になることはなかったが、1990年から2000年にかけてはしばしば1.8m以上が記録されている。ただし2000年以降は回復傾向にある。透明度とプランクトン沈殿量の間には、1985年以降、透明度の高い年にプランクトン沈殿量も多いという関係が見られた。DIN, PO₄-P濃度については、1985年以前には、プランクトン沈殿量が多い年にはこれら栄養塩濃度が低いという関係があった。1985年以降になると、逆に栄養塩濃度の高い年にプランクトン沈殿量が多いという関係に変化した。この関係はDINで顕著であった、PO₄-P, DIN共に、1985年以降の濃度変化にトレンドは見られなかった。成層強度は年々の変動が大きく、長期的なトレンドは認められなかった。しかし、プランクトン沈殿量との関係については、1985年以前は成層が弱い年にプランクトン沈殿量が多かったのに対し、それ以降は成層が強い年にプランクトン沈殿量が多いという関係に変化した。これは、DIN, PO₄-P濃度との関係と同様である。

図-6は、プランクトン沈殿量と栄養塩濃度、成層強度といった環境パラメータの関係が31年の間に变化したことを示している。そこで、連続した11年を一区切りとしてその間の環境パラメータとプランクトン沈殿量の相関関係を調べ、相関係数の長期変動について検討した。Window幅を11年としたのは、図-6の環境パラメータについて5~6年程度の変動が多く見られ、プランクトン沈殿量では1995-2004年で10年、透明度やDINでも10-11年になるような変動が見られたためである。水温、DIN, PO₄-P, Siとプランクトン沈殿量の相関係数は同じような変動を示し、1980年代前半以前は負の値で、1980年代後半を境に正に転じた(図-7)。透明度とプランクトン沈殿量の相関は1980年代前半まではあまりなかったが、その後相関係数が大きくなり正の相関がみられるようになった。すなわち、両者の間には、透明度が高いほどプランクトン沈殿量が多いという関係があり、こうした関係は近年になるほど強まっていた。成層強度とプランクトン沈殿量には、初期には負の相関が見られたが、相関係数が徐々に大きくなり正の相関に変わった。ただし、相関係数 $r = 0.521$ ($p = 0.1$) を基準にすると、水温、Si、成層強度についてはほとんど有意な相関はなかった。

植物プランクトン現存量の変動には基礎生産以外に捕食が影響する。水深の浅いエスチャリーでは、二枚貝による捕食の影響が大きいことが知られている¹⁴⁾。そこで本研究では、二枚貝バイオマスの指標として佐賀県有明海区における貝類漁獲量データを用い、秋季~冬季のプランクトン沈殿量と比較した。漁獲量に含まれる貝類は全て濾過食性の二枚貝であり、その大半をサルボウ (*Scapharca subcrenata*) が占めている。サルボウの漁期は春から夏にかけてであるため¹⁵⁾、秋季~冬季のプランクトン沈殿量データに対して翌年の貝類漁獲量を比較した(図-8)。両者の間には、貝類漁獲量が多いほどプランクトン沈殿量が少ないという明瞭な関係があり、有

意な負の相関 ($p < 0.01$) があった。プランクトン沈殿量について3年の移動平均をかけて比較すると相関はさら

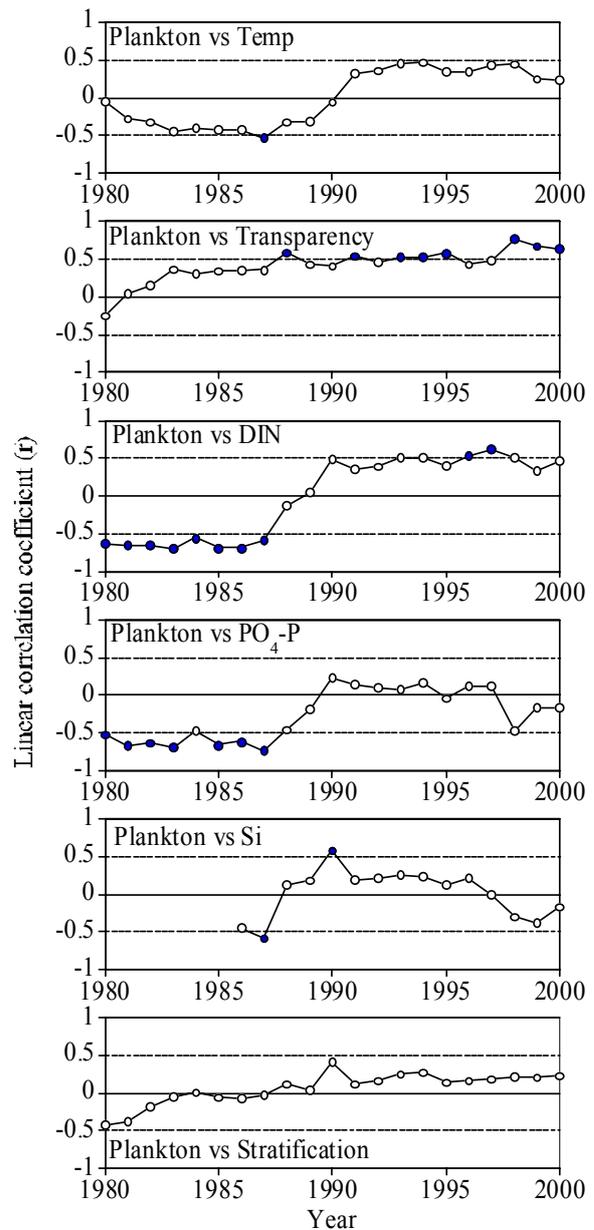


図-7 プランクトン沈殿量と、水温、透明度、栄養塩濃度、成層強度の相関係数の長期変化。黒丸は $p < 0.1$ を示す。

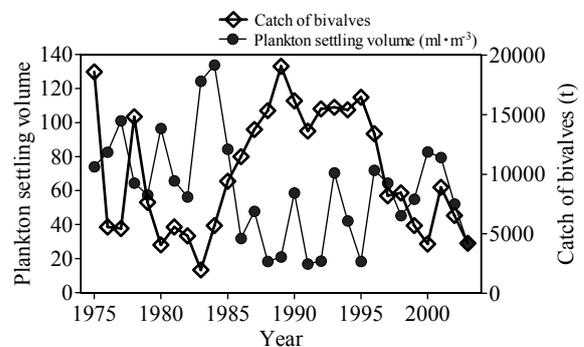


図-8 秋冬季のプランクトン沈殿量と、翌年の貝類漁獲量の年変動比較。

表-2 プランクトン沈殿量 (y) を目的変数に、二枚貝漁獲量 (x_1)、表層DIN濃度 (x_2)、透明度 (x_3) を説明変数とした重回帰分析の結果。データの期間は1986年～2003年(n=18)である。

y-intercept a	Partial regression coefficients			Standard partial regression coefficients			R ²	R ²
	x_1 (bivalves)	x_2 (DIN)	x_3 (transparency)	x_1' (bivalves)	x_2' (DIN)	x_3' (transparency)		
-13.216	-2.808	3.342	44.664	-0.544	0.345	0.481	0.57	0.48

に良くなり、 $r = -0.70$ になる。こうした結果は、有明海奥部における植物プランクトン量が二枚貝の捕食によって強くコントロールされていることを示唆している。

以上の結果を踏まえて、秋季～冬季について、プランクトン沈殿量を目的変数、水温、DIN濃度、 PO_4 -P濃度、Si濃度、透明度、成層強度、翌年の貝類漁獲量を説明変数の候補として、重回帰分析をおこなった。プランクトン沈殿量およびその栄養塩濃度との関係が1985年を境に大きく変化していたため、ここでは1986年以降を対象にした。変数増減法によって説明変数を選択したところ、DIN、透明度、貝類漁獲量の3つが選択された。結果を表-2に示す。実測結果と重回帰モデルによる推定結果は良く一致し、標準偏回帰係数の絶対値は、貝類漁獲量が最も大きく、続いて透明度、DINの順であった。これは、プランクトン沈殿量の変動を最も良く説明するのは貝類漁獲量であり、続いて透明度、DINの順であることを示している。

(5) 考察

有明海奥部は主として粘土鉱物からなる懸濁物が大量に浮遊しているため、透明度が非常に低いことが特徴である¹⁶⁾。有明海奥部において透明度が上昇していることは川村¹⁷⁾によって最初に報告された。中田・野中¹⁸⁾は、有明海のように非常に濁ったエスチュアリーでは、光の条件が基礎生産を大きく制限する要因となること、透明度の上昇が光制限を緩和させ、植物プランクトン量の増加をもたらす可能性があることを指摘した。田中ら¹²⁾は、有明海奥部における連続観測の結果から、透明度の上昇にともなってクロロフィル量が増加、ケイ藻赤潮が発生したことを示し、有明海における経年的な植物プランクトン量の増加が透明度の上昇によると考えられることを報告している。本研究では、有明海佐賀県海域では秋冬季に透明度が高いほどプランクトン沈殿量が多くなり、このような関係は近年ほど強まっていることを示した。これは、基礎生産量の変動に対して光環境変動の影響が強まっていることを示唆する。1990年以降には、しばしばそれ以前に比べて極めて透明度が高い状態が見られた。こうした透明度の上昇は植物プランクトンが増殖しやすい環境を作り出している。

二枚貝類の減少が有明海における赤潮発生状況に影響を与えた可能性は、日本海洋学会海洋環境問題委員会¹⁹⁾によって既に指摘されている。本研究の結果はその指摘を裏付け、有明海奥部における秋季～冬季のプランクトン量がサルボウを主体とした二枚貝による捕食によって

強くコントロールされていることを示唆する。Nakamura²⁰⁾は有明海奥部の養殖漁場におけるサルボウの濾水量を測定し、2001年秋の状態で $1.6\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ という値を得た。有明海佐賀県海域の海水量を $1700 \times 10^6\text{ m}^3$ とすると、サルボウ養殖漁場の面積は 53 km^2 なので、これは養殖漁場のサルボウによる濾水量20日分に相当する。2001年はサルボウ漁獲量が最も低水準にあった年である。1988～1997年には2001年の3倍程度の漁獲量があった。したがって、この時期には養殖漁場のサルボウは1週間で有明海佐賀県海域全ての海水を濾過するほどの濾水量を有していたと推定される。このことから、植物プランクトン量変動に対するサルボウによる捕食の影響が非常に大きいことがわかる。貝類による植物プランクトン捕食圧の低下が赤潮増加要因の1つになっていることは、中嶋ら²¹⁾も示唆している。有明海奥部におけるサルボウ資源の変動機構については、これまで研究が少なく、よくわかっていない。その中で真崎・小野原¹⁵⁾は、過去にあった1960～1965年および1974～1985年のサルボウ漁獲低迷期については、夏季の大量降雨の影響による稚貝発生量低下が原因になった可能性を指摘している。一方で、近年の漁獲量低下については過去の2回とは状況が異なると述べている。1997年から2002年にかけてのサルボウ漁獲量の変動パターンは、諫早湾から有明海奥部におけるマクロベントス量の変動²²⁾とよく似ている。こうしたマクロベントス量の変動には、諫早湾締切にともなって生じた底質変化や貧酸素水塊発達が影響したことが指摘されている。今後はサルボウを主体とした有明海奥部の二枚貝資源量の変動要因について、詳しく検討する必要がある。

前節で述べた結果は、1985年以降の有明海における秋冬季の植物プランクトン量の変動は、透明度とDIN濃度、二枚貝現存量の影響を強く受けていることを示唆している。この間、DIN濃度変化についてはトレンドが見られなかったが、透明度は上昇傾向にあった。二枚貝漁獲量は1996年から97年にかけて大きく減少しており、この時期に二枚貝現存量は大きく減少したと考えられた。赤潮データの解析結果は、1985年～2002年の期間、年間赤潮発生日数は増加傾向にあり、特に1997年以降の増加が著しいことを示した。赤潮増加の主要原因は、秋冬季のケイ藻赤潮の増加であった。以上の結果は、透明度の上昇による基礎生産促進と、二枚貝現存量減少による捕食圧の低下によって、赤潮が増加した可能性が高いことを示している。

有明海における赤潮の増加については、透明度や捕食

の影響以外に、諫早湾締切によって潮流が変化し、海域が成層しやすくなった、あるいは河川水の滞留時間が長くなったことが要因として指摘されている⁷⁾。しかし、本研究の結果からは、表層の成層強度変動に経年的なトレンドはなく、成層強度とプランクトン沈殿量の変動の間に有意な相関も見いだせなかった。また柳・阿部²³⁾は、有明海における淡水の平均滞留時間は基本的には河川流量に依存しており、1990～2000年の期間では経年的なトレンドは見られないことを示している。成層強度、海水交換の変化が赤潮増加をもたらしたと考える根拠としては、秋季の大規模赤潮の規模は赤潮発生前40日間の降水量と相関があり、その関係が諫早湾締切以降に変化、同じ降水量に対して赤潮が大規模化したことが挙げられる⁷⁾。しかし、これは貝類現存量の変化によっても説明可能である。植物プランクトン密度の変化は生産と死亡・系外への移流のバランスによって決まる。堤らの考え方は、1) 成層が強まった結果、植物プランクトンが表層に留まりやすくなった、2) 海水交換が弱まった結果沖合に輸送されにくくなった、というもので、移流の減少を意味する。一方で、二枚貝の漁獲量は1996年から1997年にかけて激減しており、1988～1996年には15000トン程度であったものが、1997年以降は平均して半分程度になっている。このことから、1996-97年を境に貝の捕食による植物プランクトンの死亡が半分になったと考えられる。したがって、堤らが移流の減少と考えた効果を、捕食による死亡の減少に置き換えたとしても、上記の諫早湾締切に対応した降水量と赤潮指数の関係の変化は説明可能である。

有明海におけるノリ養殖は、養殖期間中の降雨、風、

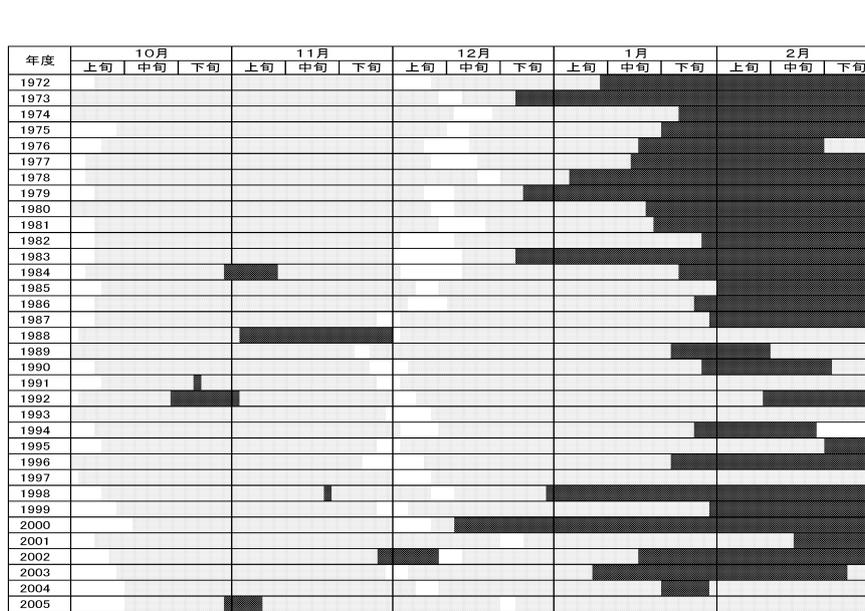


図5 佐賀県ノリ養殖東部漁場における色落ちの発生状況
 ■: ノリ漁中に確認された色落ち □: ノリ生産 □: ノリ網撤去

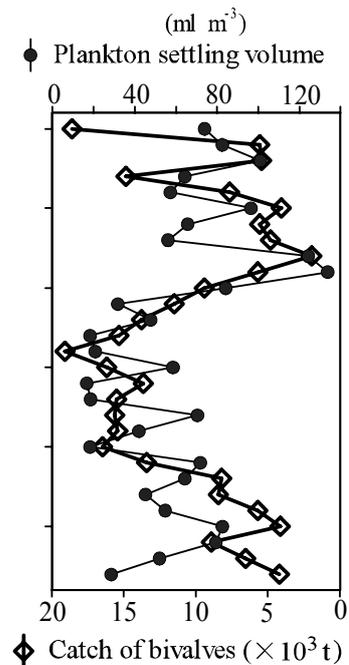
図9 佐賀県ノリ養殖東部漁場における色落ちの発生状況(川村²⁴⁾を改変)と、秋～冬季のプランクトン沈殿量、翌年の貝類漁獲量の変動。

日射量等の自然条件に左右されるが、現在、ノリの生産は主に植物プランクトンの発生によって栄養塩が減少し、色落ちが起きることによって終了する²⁴⁾。2000年度には *Rhizosolenia imbricata* によって大規模な色落ち被害が起きたが、それ以前にも色落ちは発生している。こうした色落ちの発生時期を、図-8の秋冬季平均プランクトン沈殿量、二枚貝漁獲量の変動と比較すると、長期傾向がよく一致する(図-9)。これは、植物プランクトンの現存量が二枚貝による捕食圧の変化によって増減し、その影響が養殖ノリの生産に及んでいることを示唆している。

3. 透明度の長期変動について

(1) 目的

前章では、有明海奥部の植物プランクトン量変動には透明度が強く関与しており、透明度の上昇が赤潮増加の要因の1つである可能性が高いことを示した。清本ら²⁵⁾は、有明海の各海域における透明度の上昇率と赤潮発生日数の変化を比較し、透明度上昇率が高い水域と赤潮の増加が著しい海域が一致することを示している。このことも、有明海における赤潮増加に対して透明度の上昇が重要な要因であることを示している。有明海奥部における透明度の上昇は川村¹⁷⁾によって既に指摘されているが、その原因については今も明らかになっていない。そこで本研究では、長期モニタリングデータを解析し、この海域における透明度上昇の原因を明らかにすることを目的とした。



(2) 資料

透明度の長期変動を調べるため、佐賀県有明水産振興センターが1972年～2005年度におこなった浅海定線調査データを解析した。他に、水資源機構が1977年～2003年におこなった筑後大堰関連水質調査の濁度データ、環境省によって2001年～2003年におこなわれた有明海海域環境調査の透明度とSSデータを解析に用いた。図-2に水資源機構の観測定点を浅海定線調査定点と合わせて示す。

(3) 結果

有明海奥部の透明度と表層SS濃度について、両者が同時に測定された環境省のデータを用いて調べると、図-10の関係が得られた。本稿では、この関係を用いて透明度から表層SS濃度の経年変動を推定した。図-11は、測点S6の透明度から推定したSS濃度と、その近辺の水資源機構の測点W6における表層濁度を比較したものである。両者の変動は、1979年以前については合わないが、1980年以降はほぼ一致した。濁度はSS濃度を指標するので、これは少なくとも1980年以降については透明度から過去の表層SS濃度変動を推定することが可能なことを示している。

有明海佐賀県海域の平均透明度は、1970年代から90年代後半にかけて上昇傾向にあった(図-12)。詳しく見ると、1980年代前半に急激な透明度上昇があったこと、

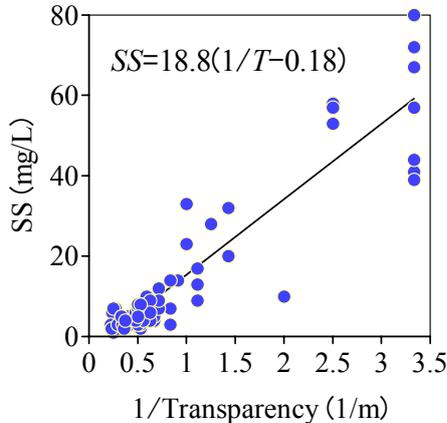


図-10 2001～2年度の環境省調査データによる透明度と表層SSの関係。

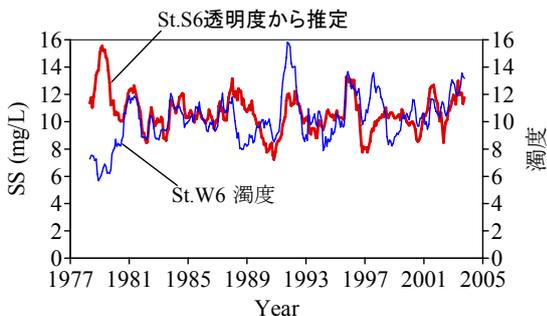


図-11 透明度から推定したSSと濁度の変動の比較(12ヶ月移動平均)

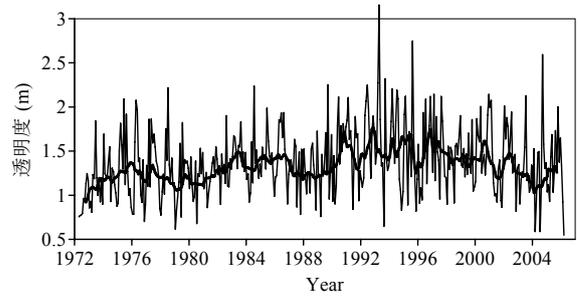


図-12 有明海佐賀県海域測点S1～10の平均透明度の経年変化。細線は毎月の値、太線は12ヶ月移動平均。

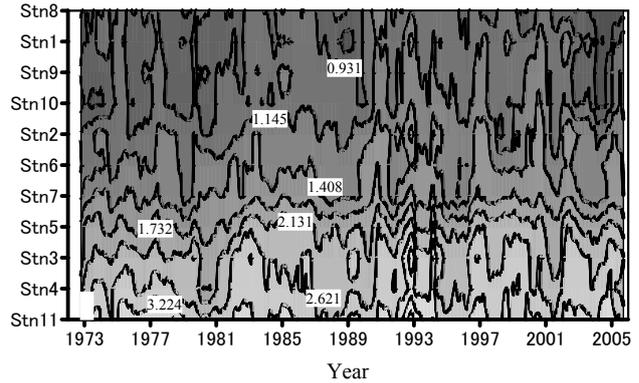


図-13 透明度(12ヶ月移動平均)分布の経年変化。縦軸は測点で全期間の平均値の順。コンターは対数スケールで約0.09間隔。

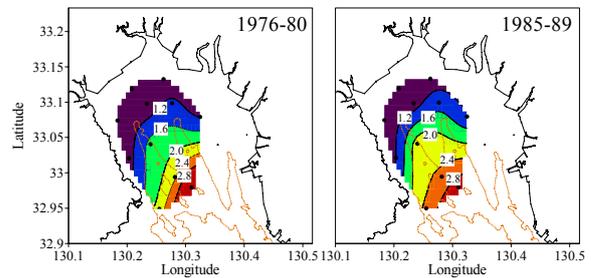


図-14 1974～80年と1985～89年の平均透明度分布。

1990年から2000年にかけて透明度が高い時期が続いたことが特徴である。測点毎に透明度の変化を比較すると、1980年代前半の透明度上昇は、特に海域中部の測点S5、S7付近で顕著であった(図-13)。1976～80年と1985～89年の各5年間について平均透明度の空間分布を比較した結果からも、海域中部で透明度の上昇が著しいことがわかる(図-14)。両期間でもっとも透明度の差が大きかったのは測点S5で0.46mに達した。そこで、このような急激な透明度上昇が生じた原因を検討した。前章で示したように、この時期は海域のプランクトン沈殿量に減少はなく、プランクトンの減少が透明度上昇の原因とは考え難い。筑後川の瀬の下におけるSSフラックスにはこの時期に対応した急激な減少はなく(山本ら、本成果報告集)、陸域からのSS負荷量減少も原因とは考え難い。

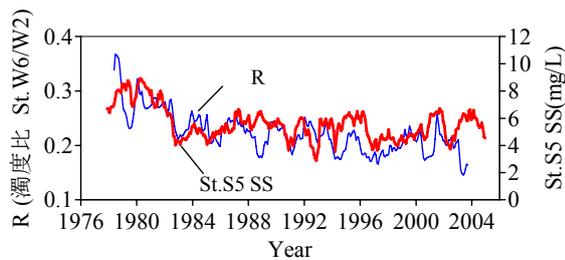


図-15 測点W6とW2の表層濁度の比(R)と測点S5における透明度から推定したSS濃度の時間変動の比較. いずれも12ヶ月移動平均した値.

図-11のように、筑後川河口沖濁筋の測点W6の表層濁度にもそれほど大きな減少は見られなかった. 一方で、筑後川河口の測点W2とW6の表層濁度比と、測点S5の透明度から推定したSS濃度を比較すると、両者の変動はよく一致し、共に1980年代前半に急激な減少を示した(図-15). 濁度比は1990年頃まで長期的に低下しており、1990年代から2000年代の数年スケールの変動もよく一致する. 濁度はSS濃度を指標するので、これは、筑後川河口に対する河口沖濁筋のSS濃度が低くなると、有明海湾奥の中央部で透明度が上昇することを示している.

(4) 考察

一般に、定常を仮定し、湾奥にSSの供給源がある鉛直一様なエスチャリーを考える. 沖向きにx軸をとり、水平1次元で考えると、任意の点xにおける懸濁物濃度D(x)は以下の式で表される.

$$D(x) = D_0 \exp\left(-a\sqrt{\frac{w}{K}}x\right) \quad (1)$$

ここで、 D_0 は原点における懸濁物濃度、 K は水平拡散係数、 w は懸濁物の沈降速度、 a は定数である. ここで点 x_1 および x_2 における懸濁物質濃度が既知であるとすると、これらの点における懸濁物質濃度の比は次式で表される.

$$\frac{D(x_2)}{D(x_1)} = \left(\exp\left(-a\sqrt{\frac{w}{K}}x\right) \right)^{\Delta x} \quad (2)$$

ただし、 $\Delta x = x_2 - x_1$ である. ここで $D(x_2)/D(x_1) = R$ とすると、式(1)は以下のように表される.

$$D(x) = D_0 (R)^{\frac{x}{\Delta x}} \quad (3)$$

よって、

$$\log(D(x)) = \frac{x}{\Delta x} \log(R) + \log(D_0) \quad (4)$$

という関係が得られる. これは、エスチャリー内の任意の点における懸濁物濃度について対数値をとると、それは濃度が既知の2点の懸濁物濃度比の対数値に比例する

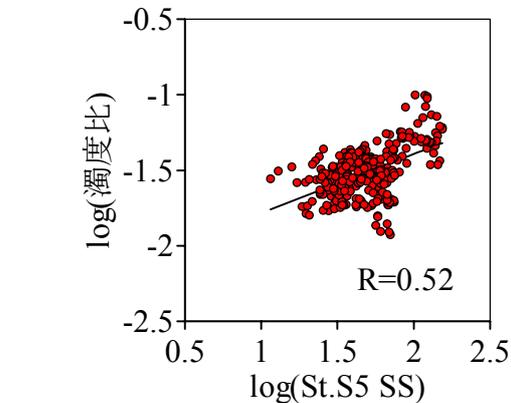
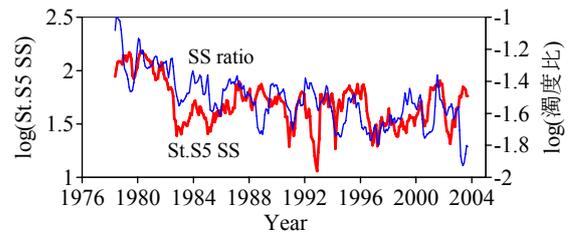


図-16 測点W6とW2の表層濁度の比(R)と測点S5における透明度から推定したSS濃度について、両者の対数値を比較したもの. いずれも12ヶ月移動平均した値.

ことを示す. すなわち、図-15では測点W6とW2の濁度の比と湾中央部における推定懸濁物濃度を比較したが、厳密には両者の対数値が互いに関係するはずである. 図-16は、図-15に示した濁度の比と、透明度から推定した湾中央部の懸濁物濃度について、両者対数をとって比較したものである. 両者の変動パターンは非常によくあっていることがわかる. 筑後川の感潮域から河口沖では、潮汐によって上流に比べて極めて高濁度な水塊が形成されている²⁶⁾. 式(2)から、濁度比Rの減少はこの水域内の水平拡散係数の減少あるいは沈降速度の増加を示すことがわかる. ここで言う沈降速度とは、ネットの値であり、沈降フラックスから再懸濁フラックスを引いた値を懸濁物濃度で割ったものに相当する. したがって、沈降速度の増加とは、沈降フラックスの増加あるいは再懸濁フラックスの減少を意味する. 別の見方をすると、Rの減少とは、懸濁物質が筑後川河口付近から河口沖の干潟域に溜まりやすくなったことを意味する. 図-14のように、濁度比Rの低下は長期的には1970年代から継続して生じており、低下傾向を弱めながら1990年頃まで続いている. これは、有明海湾奥部では長期的に筑後川河口付近から河口の干潟域にかけて懸濁物質が溜まりやすくなる傾向が続き、それによって沖合に供給される懸濁物質が減少し、長期的な透明度上昇の原因になったのではないかと推察される. このような懸濁物質動態の変化が生じた原因については、現時点では不明である. 流れの弱まり、底質、地形の変化がこうした変化を生じさせ得る. 今後は、このような変化が生じた原因について、詳しく

検討を進める必要がある。

謝辞：本稿をまとめるにあたって、データを提供いただいた佐賀県有明水産振興センター、水資源機構筑後大堰管理所、日本水産資源保護協会有明海等環境情報・研究ネットワークに感謝します。長年にわたって地道なモニタリングを続けてこられた関係各位の努力に深く敬意を表します。また、佐賀県有明海再生課の川村嘉広博士には、多くの貴重なコメント、議論をいただいた。図-9(左)は氏から提供を受けたものである。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 速水祐一、他 8 名：有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について ―初年度の成果―、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 2, pp.37-46, 2006.
- 2) 速水祐一：有明海奥部の貧酸素水塊 ―形成機構と長期変動―、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 3.
- 3) 佐賀県有明水産試験場：有明海における珪藻プランクトンの発生、赤潮情報交換事業研修資料, 1985.
- 4) 川村嘉広：有明海奥部におけるここ数年の栄養塩不足とノリ生産体制、海苔と海藻, 67, pp.1-5, 2004.
- 5) 山本憲一、藤井明彦、松田正彦：二枚貝等の生産阻害要因の解明, pp.96-103。「有明海の海洋環境の変化が生物生産に及ぼす影響の解明」、農林水産省農林水産技術会議事務局編集・発行, 2005.
- 6) 田中勝久、児玉真史、藤田孝康、木元克則、岡村和麿、森勇一郎：有明海湾奥西部域における貧酸素水塊と底質環境の変動過程、2005年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 197, 2005.
- 7) 堤裕昭、木村千寿子、永田紗矢香、佃政則、山口一岩、高橋徹、木村成延、立花正生、小松利光、門谷茂：陸域からの栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大規模赤潮の発生メカニズム、海の研究, 15, pp.165-189, 2005.
- 8) 環境省：有明海・八代海総合調査評価委員会―中間取りまとめ―、<http://www.env.go.jp/info/iken/h180328a/index.html>, 139pp, 2006.
- 9) 日本水産資源保護協会：有明海等環境情報・研究ネットワークwebsite、<http://ay.fish-jfrca.jp/ariake/gn/index.asp>, 2003.
- 10) 九州農政局佐賀統計・情報センター：第52次佐賀農林水産統計年報。佐賀農林統計協会, 2006.
- 11) 武岡英隆：瀬戸内海における透明度の分布とその季節変動、海と空, 63, pp.15-27, 1987.
- 12) 田中勝久、児玉真史、熊谷香、藤本尚伸：有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動、海の研究, 13, pp.163-172, 2004.
- 13) 福岡県有明水産試験場、熊本県のり研究所、佐賀県有明水産試験場、長崎県水産試験場：昭和63年度赤潮対策技術開発試験報告書, 1988.
- 14) Cloem, J. E. : Does the benthos control phytoplankton biomass in South San Francisco Bay?, Marine Ecology Progress Series, 9, pp.191-202, 1982.
- 15) 真崎邦彦、小野原隆幸：有明海奥部におけるサルボウの漁業実態と分布状況、佐有水研報, 21, pp.29-36, 2003.
- 16) 代田昭彦、近藤正人：有明海 III 化学, pp.846-862。「日本全国沿岸海洋誌」、日本海洋学会沿岸海洋研究部会編、東海大学出版会, 1985.
- 17) 川村嘉広：佐賀県有明海域におけるノリの生産状況と環境変化、海苔と海藻, 64, pp.4-9, 2002.
- 18) 中田英昭、野中裕子：有明海における海況の経年的な変化。月刊海洋, 394, pp.256-260, 2003.
- 19) 日本海洋学会海洋環境問題委委員会：有明海環境悪化機構究明と環境回復のための提言、海の研究, 10, pp.241-246, 2001.
- 20) Nakamura, Y. : Suspension feeding of the ark shell *Scapharca subcrenata* as a function of environmental and biological variables, Fisheries Science, 71, pp.875-883, 2005.
- 21) 中嶋雅孝、横山佳裕、内田唯史、中野拓治、中西弘：有明海における冬季のノリ及び赤潮プランクトンの増殖特性、水環境学会誌, 28, pp.339-345, 2005.
- 22) 東幹夫：底棲動物相の経年変化、In 日本海洋学会編 有明海の生態系再生をめざして。pp.118-128, 2003.
- 23) 柳哲雄、阿部良平：有明海の塩分と河川流量から見た海水交換の経年変動、海の研究, 12, pp.269-275, 2003.
- 24) 川村嘉広：有明海奥部のノリ養殖、海洋と生物, Vol28(6), pp.603-610, 2006.
- 25) 清本容子、田中勝久、山田一來、中田英昭：水産試験研究機関によるモニタリングー有明海における浅海定線調査ー、沿岸環境関連学会連絡協議会第15回ジョイントシンポジウム要旨集, pp.5-8, 2006.
- 26) 代田昭彦、田中勝久：有明海における懸濁物質の研究-I. 筑後川懸濁粘土粒子の河口域への輸送、西水研研報, 56, pp.27-38, 1981.

(2007. 3. 19受付)

有明海奥部の貧酸素水塊 -形成機構と長期変動-*

Hypoxic water mass in the inner area of the Ariake Sea
: its formation and inter-annual variation

速水祐一¹

Yuichi HAYAMI

¹農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

There are two patterns of the hypoxic water mass formation in the inner area of the Ariake Sea. The hypoxic water mass was formed 1) when there was a strong vertical stratification caused by the river flood, and 2) when the stratification was enhanced caused by the intrusion of saline water in the bottom layer. The long term variation in the bottom DO in July was also investigated. When the influence of the inter-annual variation in stratification was removed, the bottom DO in the inner-area of the Ariake Sea was decreased between 1972 and 2001. It indicates that this area became potentially hypoxic during last 30 years. It would be caused by the increase of the organic matter in this water.

Key Words : Hypoxia, long term variation, river flood, bottom intrusion, COD

1. はじめに

有明海では、近年は毎年のように貧酸素水塊が形成されている。こうした貧酸素水塊は、二枚貝類や底魚などの水産資源減少の原因になっている可能性が指摘され、問題になっている(環境省, 2006¹⁾など)。このような貧酸素水塊の形成・継続・消滅の機構については、最近、多くの調査研究がおこなわれており、その実態が明らかになってきた。ただし、長期的に貧酸素化が進行したか否かについてはまだ明確になっていない。1972年から2002年までの佐賀県の浅海定線調査の結果によると、地点によっては7月の底層溶存酸素濃度が減少傾向にあるところもあるが、全体としては明確な増減傾向は見られないと結論づけられている¹⁾。一方で、タイラギの斃死など貝類漁獲量の減少傾向および赤潮の頻度・規模拡大傾向から見ると、夏季の底質の還元状態は悪化傾向にあることが推察されている。

有明海の貧酸素水塊は、湾奥西部の干潟縁辺域と諫早湾内を中心に別々に発生すると考えられている^{1), 2)}。貧酸素水塊が発生するのは夏季の成層期であるが、成層が

発達する小潮期に貧酸素化が進み、大潮や強風によって鉛直混合が強まると貧酸素水塊は解消される(木元ら, 2004²⁾など)。本稿では、このうち湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成・変動機構について示すとともに、伊勢湾などのケースと比較する。さらに、長期的な底層溶存酸素濃度(DO)の変動傾向についても述べる。

2. 貧酸素水塊の形成・変動機構

有明海湾奥西部海域の貧酸素水塊の特徴は、1)水深が大きく、鉛直的な底層への酸素供給量が少ないと考えられる沖合ではなく、干潟前面に近い浅海域で発生すること、2)比較的短期間の間に底層DOが大きく変動すること、の2点である。こうした特徴が生じる原因について考えてみる。

用いたデータは、2004、2005年の夏季に農林水産省農政局が図-1の測点でおこなった観測データである。この観測では約1週間毎にA~Fの各点で多項目水質計によって0.5m深毎に水温、塩分、DO等が測定されている。その間、測点D、Fの底上1mでは水温、塩分、流向流速、

* 速水祐一(2007)有明海奥部の貧酸素水塊-形成機構と長期変動- 月刊海洋, Vol. 39, pp. 22-28.

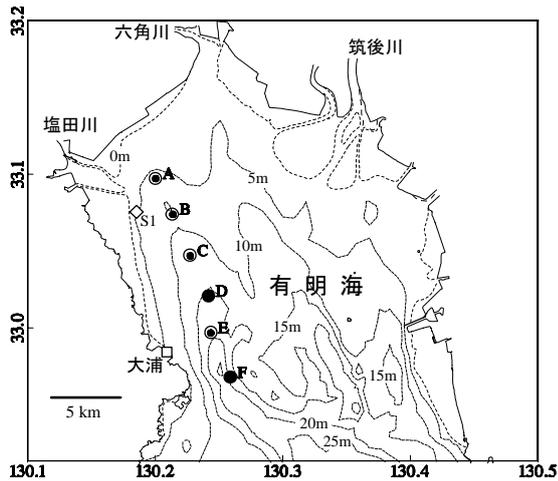


図-1 有明海奥部の海底地形と観測点. 黒丸の点では係留観測もおこなわれた. S1は佐賀県浅海定線調査の測点1である.

濁度, DOの連続観測もおこなわれた. 貴重な観測データを提供いただいた農林水産省農政局に感謝する.

貧酸素化が顕著なときには, 貧酸素水塊は密度躍層が海底に接する線(水深3~5m)の沖側底層に形成される. 図-2はA~Fを結んだ定線に沿った2004年8月12日における塩分, 溶存酸素濃度の鉛直分布図である. 湾奥表層には低塩分水が分布しており, 水柱は強く成層していた. 溶存酸素濃度は塩分31付近の塩分躍層を境に下層で低く

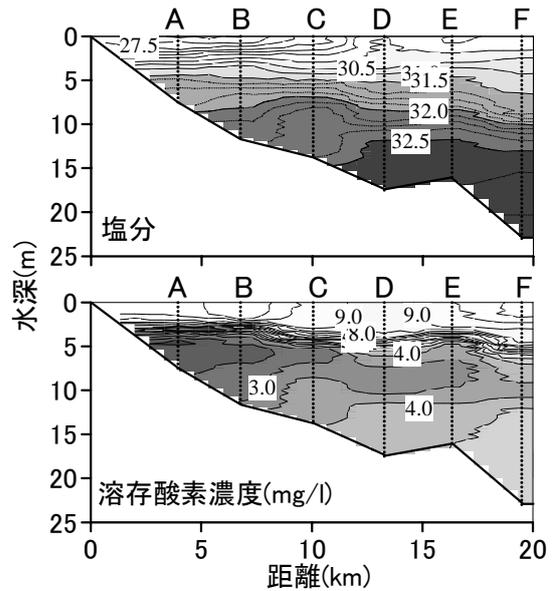


図-2 2004年8月12日における塩分, 溶存酸素濃度の断面分布.

なっており, 湾奥部には $3.0\text{mgO}_2/\text{l}$ 以下の貧酸素水塊が形成されていた. 夏季の有明海では密度成層に対して塩分の寄与が大きく, この時も密度分布はほぼ塩分によって決まっていた. また, 最奥部から少し沖では底層よりも密度躍層直下の中層で溶存酸素濃度が最も低くなっていた(中層貧酸素).

2004年7月15日から9月16日にかけての塩分, 溶存酸素

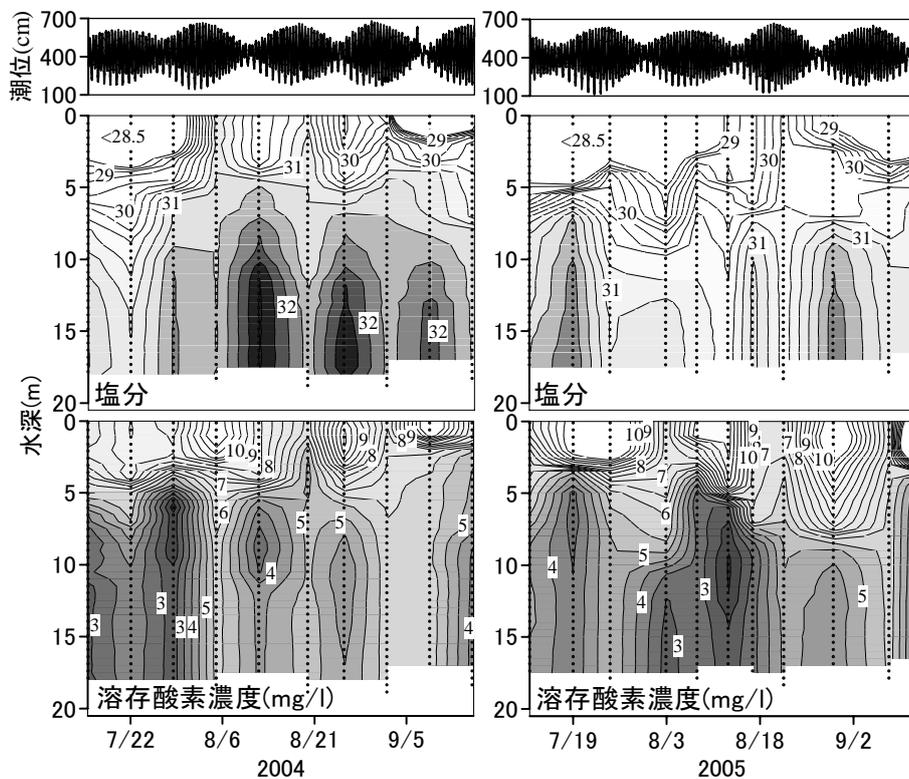


図-3 大浦における潮位および測点Dにおける塩分, 溶存酸素濃度鉛直分布の変動. 左: 2004年, 右: 2005年.

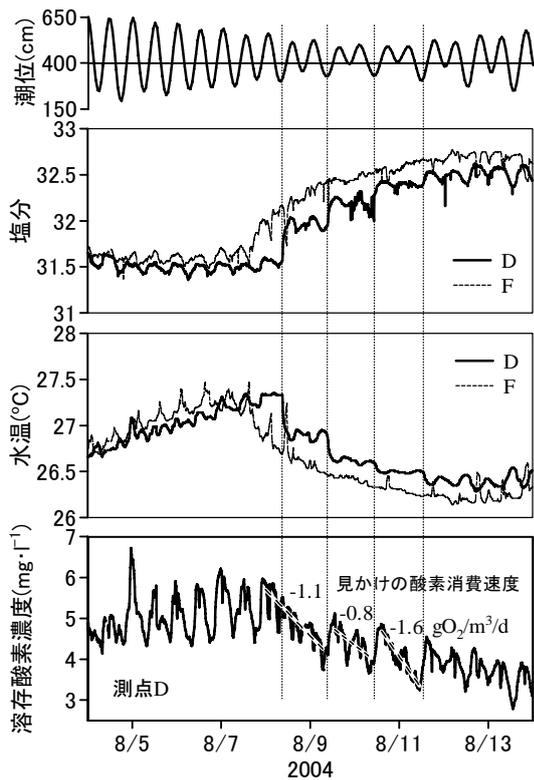


図-4 底上1mにおける水温、塩分（測点D・F）、溶存酸素濃度（測点Dのみ）および大浦における潮位の変動。

濃度の時間変動を大浦における潮位と比較した（図-3左）。2ヶ月の間、成層強度は大潮小潮周期の変動を繰り返していた。大潮期に塩分成層が弱まった後、小潮になると底層の塩分は顕著な上昇を示した。底～中層の溶存酸素濃度低下は底層の高塩分化にともなって生じていた。また、中層貧酸素は8月12日に限らず繰り返し発生していた。有明海奥部では、大潮期に強い潮流によって鉛直混合され、小潮期には潮汐混合が弱まる結果成層が強まり、それが主要因になって底層が貧酸素化するとされている³⁾。しかし、鉛直混合が弱まるだけでは塩分は上昇しない。こうした塩分上昇は沖合からの高塩分水の進入を示している。図-4は底層で最も顕著な塩分変動が生じた8月4日から14日にかけての測点D底上1mにおける水温、塩分、溶存酸素濃度の連続記録である。大浦の潮位も合わせて示す。この図から、小潮期にジャンプのような急激な底層塩分の上昇が生じており、同時に水温が急低下したことがわかる。このような水温・塩分ジャンプは測点Dより沖側の測点Fで先に発生していた。8月8日の最初のジャンプ発生時には、湾奥向きの流速が急上昇する様子も観測された。したがって、これは低温・高塩分の水塊が沖側から海底に沿って前面にフロントを形成した密度流として湾奥に貫入してきた現象であると考えられる。こうした貫入は日周潮にともなって間欠的に干潮時に繰り返し生じていた。底層の溶存酸素濃度は高塩分水が進入すると一時的に上昇したが、続いて

急激に低下した。これは、沖合から相対的に豊富な酸素を含んだ水塊が進入したものの、高密度水の底層貫入によって成層が強まり、鉛直的な酸素輸送量が低下したため、速やかに貧酸素化したことを示している。3回のジャンプに続く溶存酸素濃度の変化から、直線回帰によって見かけの酸素消費速度を見積もったところ、 $0.8 \sim 1.6 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{d}$ となった。柳（2004）⁴⁾は国内の様々な内湾における酸素消費速度をまとめている。それらの値と比較すると、物理的な酸素輸送を含んだネットの酸素消費速度としては、これは最も大きな値である。これは、有明海奥部底層では極めて活発な酸素消費が起きていることを示す。

2005年には、8月3日から17日にかけて湾奥底層に溶存酸素濃度 $3.0 \text{ mgO}_2/\text{l}$ 以下の貧酸素水塊が2週間にわたって形成された。このような長期的な貧酸素水塊の形成は2004年と大きく異なっていた。この時の塩分分布をみると、2004年と異なって表層に1ヶ月にもわたって塩分29以下の低塩分水が存在し、強い密度成層の状態が長期にわたって続いた（図-3右）。その間の8月初めには、小潮にもかかわらず底層の塩分はほとんど上昇しなかった。これは底層貫入が湾奥まで進入しなかったことを示す。すなわち、この時期の貧酸素水塊は、大潮期も通じて強い塩分成層によって鉛直的な酸素輸送が制限され、密度流による水平的な海水交換も弱い状態で形成されたと考えられる。これは、淡水供給量が多かったために、湾奥部に中海のようなラグーン（汽水湖）と同様の環境が形成され、その結果底層が貧酸素化した可能性を示唆する。さらに、大量の淡水供給の影響により、貫入水の密度が小さくなり、中層貫入になった可能性もある。

以上の結果は、有明海奥部の貧酸素水塊形成には2つの異なった機構があることを示している。1つは小潮時に沖合から高塩分水が海底に沿って密度流として貫入し、湾奥の密度成層を強化するとともに速やかに貧酸素化するという機構である。この機構による貧酸素化は、淡水供給が少ない場合でも生じる。この機構で生じた貧酸素水塊は大潮小潮周期で形成、解消を繰り返す。もう1つは、出水にともなって河川プルームが長期にわたって発達することによって生じる。この場合は、潮汐混合が強い大潮期でも貧酸素水塊は解消しにくい。貧酸素化が長期にわたると、著しい底層溶存酸素濃度の低下が生じる。山口・経塚（2006）⁵⁾は、2004年夏季の観測から、諫早湾の貧酸素水塊についても小潮時の重力循環流強化が引き金になっていることを指摘した。これは、諫早湾の貧酸素水塊形成に対して上記の前者と同じ機構が存在することを示している。

先に述べたように、有明海奥部では貧酸素水塊が干潟前面に近い浅海域に形成されることが特徴である。このことについては2つの理由が考えられる。1つは、小潮期に発生する底層貫入（密度流）が湾奥まで進入するという有明海の持つ物理的特性である。さらに、この湾奥

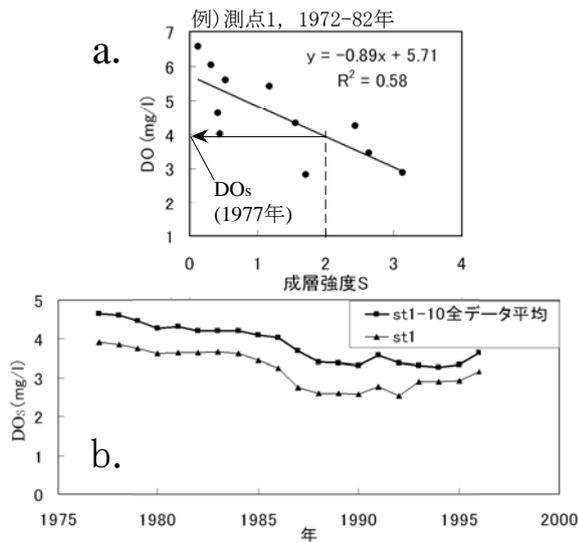


図-5 a) 浅海定線測点1における1972-82年7月の底層DOと成層強度の関係およびDO_sの定義, b) 7月の底層DO_sの経年変動。

水域が大きな酸素消費速度を持つということも理由の一つである。これらは、底層の溶存酸素濃度が2週間以内の短周期で変動するという有明海奥部の貧酸素水塊のもう一つの特徴にも関わっている。すなわち、貧酸素水塊が形成されやすい水域が浅く、風による混合が底層まで及びやすいということに加え、大潮時に鉛直混合され、小潮になると沖合から密度流が貫入してくること、そして大きな酸素消費によって速やかに貧酸素化が進むことが、その原因になっている。このような大きな酸素消費が生じる原因としては、有明海奥部は流れによって有機懸濁物質が輸送集積される場所であり、そうした懸濁物質が活発に沈降・再懸濁を繰り返していることが挙げられる⁶⁾。徳永ら(2005)⁷⁾は、有明海では懸濁物質による酸素消費速度は底泥の7倍にもなると報告している。中層貧酸素水塊については、大きな酸素消費のために底層貫入発生から1日の間に速やかに貧酸素化が進んだ後、さらに高塩分の水が貫入することにより、貧酸素水塊が持ち上げられることによってできると考えられる。こうした沖合からの底層貫入によって中層貧酸素水塊が形成されるという機構は、Fujiwara and Yamada (2002)⁸⁾が示した東京湾における中層貧酸素水塊形成機構と共通する。

近年、内湾における貧酸素水塊の形成・変動には、湖と異なって水平輸送過程が強く効いていることが、伊勢湾、東京湾など各地で指摘されている^{8),9)}。上記の結果は、有明海の貧酸素水塊についても例外ではないことを示している。大潮小潮周期の貧酸素水塊の変動は、有明海と同様に夏季の伊勢湾でも報告されている¹⁰⁾。これは、鉛直混合の強い大潮期には湾口で形成された混合水が湾内中層に貫入することによってその下の海水が貧酸素化し、鉛直混合の弱い小潮期には底層への貫入となり、貧

酸素水塊を持ち上げて中層貧酸素を引き起こすというものである。一方、有明海の場合は、貧酸素水塊は小潮期の底層貫入によって形成され、日周期で間欠的に密度流が貫入することによって中層貧酸素水塊になる。こうした違いには、伊勢湾に比べて有明海の潮汐が大きく、鉛直混合が強いこと、さらに酸素消費速度が大きいことが関係していると考えられる。

3. 底層溶存酸素濃度の長期変動

貧酸素問題を扱うにあたって最も重要な点の一つは、過去に比べて貧酸素化が進行したのかどうか明確にすることである。もし、人為的な影響がなくても昔から貧酸素水塊が形成されていたのであれば、それは海域にもともと備わっていた特質の一つということになる。そうではなく、過去には軽微であったあるいは頻繁には発生しなかったにもかかわらず、貧酸素化が進んだのであれば、その原因を明らかにすることが重要になる。

有明海奥部の底層DOについては、地点によっては低下傾向がみられるものの、全体としては明確なトレンドはみられないと報告されている¹⁾。一方、経年的に比較すると、夏季の有明海奥部は成層が強いほど底層溶存酸素濃度が低く、さらに、成層の強さは短期的な淡水供給量の変動に依存する¹¹⁾。これは、モニタリングデータにみられる底層DOの経年変動は、調査日前の淡水供給量の違いの影響を受けて大きくばらついていることを意味する。そこで、底層DOの経年変動に関して、成層強度変動の影響を除いて評価することを試みた。用いた資料は佐賀県有明水産振興センターによる7月の浅海定線調査データで、日本水産資源保護協会・有明海等環境情報・研究ネットワークからダウンロードしたものをを用いた。データの期間は1972年から2001年までの30年である。

7月の成層強度と底層DOの間には負の相関関係がある。そこで、連続した11年間ずつの成層強度と底層DOの間で回帰直線を求め、得られた回帰直線上である一定の成層強度の時のDO (DO_s) を求めた(図-5a)。こうすることで、年々の成層強度変動の影響を除いた長期的な底層DOの変化を調べることができる⁶⁾。成層強度については、表層と底層の密度差を水深で割った値について、さらに測点間の比較が可能のように全データ期間の平均値で規格化したものをを用いた。DO_sは成層強度=2の時の値とした。貧酸素水塊がよく発達する湾奥西部の測点1(図-1, S1)についてみると、対象とした全期間について、各11年間で成層強度と底層DOの間には有意な負の相関が見られた(p<0.05)。また、DO_sは低下傾向にあり、特に1980年代における低下が著しかった(図-5)。他の測点では必ずしも有意な相関が常にあったわけではないが、測点1~10の平均値についてみた場合でも、7月のDO_sは測点1と同じようなパターンの経年変動を示し

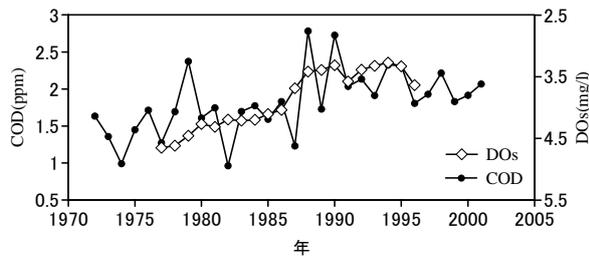


図-6 7月の底層CODとDO_sの経年変動（測点1～10平均）．DO_sは軸の方向が上下逆なので注意のこと．

た（図-5）．この結果は、有明海奥部の7月については、過去30年間に同じ成層強度であっても底層の溶存酸素濃度が低くなったこと、すなわち貧酸素化し易くなったことを示している．測点1～10の成層強度の平均値についてみると、年々の変動が大きいものの全体としては減少傾向にあった．これは、柳・下村（2004）¹²⁾の結果と一致する．上記の結果は、酸素消費速度の増大あるいは酸素の水平輸送量の減少が長期的な貧酸素化進行の原因になっていることを示唆する．図-6 は7月の底層CODの経年変化（測点1～10平均）である．CODは経年的に上昇傾向にあり、特に1980年代における上昇が著しく、DO_sの経年変動とよく似たパターンを示している．このことから、長期的な（特に1970年代から90年にかけての）DO_sの低下に対しては、有機物量の増加による酸素消費速度の増大が原因になっている可能性が高いと推察される．このことは、現在の有明海奥部底層の酸素消費速度が極めて大きいという前章の結果とも符合する．

4. おわりに

貧酸素水塊の形成は、内湾の富栄養化が引き起こす環境問題の代表的なもののひとつである．ただし、これを病気に例えると、貧酸素化はあくまでも症状であって、病気の本質ではない．大事なことは、病気の原因を明らかにし、それを取り除くことである．そういう意味では、有明海奥部が貧酸素化し易くなったことの本質的な原因の1つは海域における有機物量増加に起因する酸素消費速度の上昇であると考えられる．病気の場合もそうだが、一度病状が悪化してしまうと、原因を取り除いたからといってすぐには回復しない．病気の原因を取り除くと同時に、人間が手を加えてよりよい環境をつくってやらないと回復しない場合もある．今後は、そのためにどのような施策をおこない得るのか検討するとともに、社会の反応を考えると、施策を講じてから結果が現れるまでの程度の時間がかかるのか示していく必要もあるだろう．

謝辞：本稿をまとめるにあたって、貴重な観測データを

ご提供いただいた農林水産省農政局に感謝する．浅海定線調査データについては、日本水産資源保護協会・有明海等環境情報・研究ネットワークからダウンロードしたものを用いた．本データの使用に許可をいただいた佐賀県有明水産振興センターに感謝すると共に、多年にわたって調査を継続してこられた関係者各位の努力に敬意を表する．また、本稿をまとめるにあたってご支援いただいた佐賀大学有明海総合研究プロジェクトの各位に感謝すると共に、貴重な議論をいただいた山本浩一博士、濱田孝治博士、佐賀県有明海再生課の川村嘉広博士に感謝の意を表する．

参考文献

- 1) 環境省：有明海・八代海総合調査評価委員会—中間取りまとめ—, <http://www.env.go.jp/info/iken/h180328a/index.html>, 2006.
- 2) 木元克則, 田中勝久, 中山哲巖, 奥石裕一, 渡辺康憲, 西内耕, 藤井明彦, 山本憲一: 連続広域観測で捉えた有明海の貧酸素水塊の動態, 2004年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p.191, 2004.
- 3) 瀬口昌洋, 郡山益美, 石谷哲寛, 加藤治: 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生機構の解明とその防止法に関する研究, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 1, pp.7-14, 2005.
- 4) 柳哲雄: 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響, 海の研究, 13, pp. 451-460, 2004.
- 5) 山口創一, 経塚雄策: 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構, 海の研究, 15, pp. 37-51, 2006.
- 6) 速水祐一, 山本浩一, 大串浩一郎, 濱田孝治, 平川隆一, 宮坂仁, 大森浩二: 夏季の有明海奥部における懸濁物輸送とその水質への影響, 海岸工学論文集, 53, pp. 956-960, 2006.
- 7) 徳永貴久, 松永信博, 阿部淳, 児玉真史, 安田秀一: 有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験, 土木学会論文集, 782/II-70, pp. 117-129, 2006.
- 8) Fujiwara, T., and Yamada, Y.: Inflow of oceanic water into Tokyo Bay and generation of a subsurface hypoxic water mass, *J. Geophys. Res.*, 107(C5), 10.1029/2000JC00749, 2002.
- 9) Fujiwara, T., Takahashi, T., Kasai, A., Sugiyama, Y. and Kuno, M.: The role of circulation in the development of hypoxia in Ise Bay, Japan, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 87, pp.7985-7996, 2002.
- 10) Kasai, A, Fujiwara, T., Kimura, T. and Yamada, H.: Fortnightly shifts of intrusion depth of oceanic water into Ise Bay, *J. Oceanogr.*, 60, pp.817-824, 2004.
- 11) 瀬口昌洋, 郡山益美, 石谷哲寛, 古賀あかね: 有明海奥部における干潟域の脱窒と西岸域の貧酸素水塊の発生について, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 2, pp. 47-54, 2006.

- 12) 柳哲雄, 下村真由美: 有明海における成層度の経年変動, 海の研究, 13, 575-581, 2004.

(2007. 3. 19受付)

有明海奥部における流れと懸濁物輸送 -現地観測と数値モデルによる考察-

Current and suspended solid transport
- discussion by the observation and numerical model -

濱田孝治¹・速水祐一²・山本浩一¹・大串浩一郎³・
吉野健児⁴・平川隆一⁵・山田裕樹⁶

Takaharu Hamada, Yuichi Hayami, Koichi Yamamoto, Koichiro Ohgushi,
Kenji Yoshino, Ryuichi Hirakawa and Yuki Yamada

¹工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³工博 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科, 有明海総合研究プロジェクト
(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴水博 佐賀大学機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁵工博 佐賀大学 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁶佐賀大学 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

From late June to the end of August, 2006, an extensive observation was conducted to figure out the behavior of Chikugo river plume in summer season and its influence on the residual current, suspended solid transport, and the hypoxia at the head of Ariake Sea

Once the Chikugo river inflow increases, the plume immediately progressed along the coast on its right-hand side. As the edge of the plume passed, strong offshore-ward residual current was found at the surface. In the next phase, the bulge off the Chikugo river mouth developed and covered the head of the bay. The river plume carried suspended matter from the river to the wide area of the bay's head. Below the river plume, hypoxia made progress due to stratification. The stratification remains until the middle of July, therefore hypoxia did not decay until typhoon 10 passed away.

The influence of Chikugo river plume on the residual current was tested by a numerical model, FVCOM. M_2 tidal current component and the residual current are well reproduced by the model. However, the change of residual current during the development of the plume is inconsistent between the observation and the model. The cause of the inconsistency may be due to the disturbance of the tide on the river plume.

Key Words : Residual current, river plume, hypoxia, suspended solid transport, numerical model, FVCOM

1. はじめに

有明海においては、梅雨の終わりに筑後川、六角川、嘉瀬川、矢部川などの河川からの大出水があり、流量増大に伴って栄養塩、有機物、土砂などが大量に供給される。流入した河川水は河口沖に河川ブリュームを形成し、残差流を変化させ、湾内の物質輸送機構にも影響を及ぼ

す。さらに、成層の強化は貧酸素水塊を引き起こし、生物・化学過程を通じても海域の環境に大きな影響を及ぼすと考えられる。

こうした変動は比較的短期間に、しかも有明海奥部全体のスケールで起こる。たとえば、夏季の有明海奥部の残差流分布は風と河川流入の変動の影響を強く受け、数日程度のタイムスケールで大きく変動する¹⁾。また、漂流ブイを用いた観測では、大潮満潮時に筑後川河口に

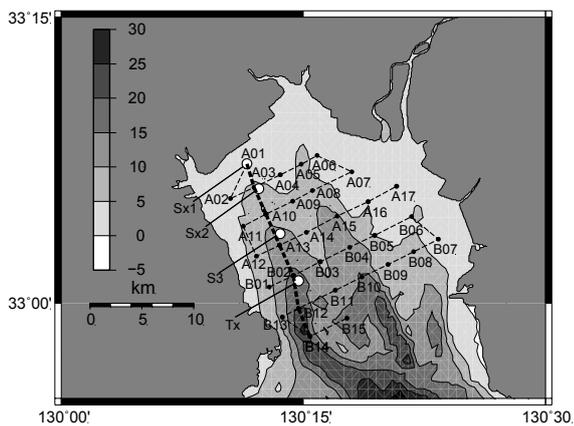


図-1 船舶観測点，係留観測点位置

あった水塊が1潮汐の間に竹崎島付近まで到達することが報告されている²⁾ことなどから、極めて短い期間に広い範囲で物質の輸送が起こり得る。さらに、有明海奥部の底層の酸素消費速度は非常に高く、河川流入に伴う成層の強化や小潮時の底層貫入などのトリガーによって数日程度のタイムスケールで容易に貧酸素化する³⁾。

有明海では現在、貧酸素水塊の発生や底泥の細粒化が大きな問題となっており⁴⁾、それを論じる際には、このような大きく、かつ急激な変化を経験する季節の現象を無視することは出来ず、変動の詳細を明らかにするために広範囲にわたり時間的に密な観測を行うことが必要である。

一方、底泥の細粒化などの長期的な変動について考察するためには、数値モデルの使用が不可欠であり、観測結果を積極的に使用して精度の向上をはかり、モデルの結果に基づく定量的な評価が行われなければならない。

以上をふまえ筆者らは、夏季の有明海奥部を対象とし、船舶観測と係留観測を組み合わせた大規模海洋観測を実施した。観測には多くの人々が参加し観測項目も多岐にわたるため、本稿では現在得られている成果のうち特に河川プリュームの挙動、河川から供給された懸濁物の輸送、河川プリュームの貧酸素水塊への影響などについて報告する。また、今回我々は新たに数値モデルとしてFVCOM⁵⁾を導入し、筑後川河口沖に形成される河川プリュームの挙動を対象としたシミュレーションを行ったので、その結果についても報告する。

2. 観測

2006年6月27日から8月25日までの約2ヶ月間、図-1に示すA01-A17, B01-B15の32点において、表-1に示す日程で漁船上からの多項目水質計による水質観測(船舶観測)を実施した。これは定線(測点A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14)上について行った定線観測と、横断方向の観

表-1 船舶観測実施状況

実施日	月齢	満潮時刻	観測期間	観測点
6/27	1.5	9:43	8:10-12:15	A01-A17, B01-B15
7/3	7.5	13:25	11:45-15:42	A01-A17, B01-B15
7/7	11.5	5:10	8:47-14:22	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
7/10	14.5	7:59	6:15-8:47	A01, A02, A03, A10, A13, B02, B12, B13, B14, B15
7/13	17.5	10:25	8:44-12:25	A01-A17, B01-B15
7/16	20.5	12:37	11:16-13:08	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
7/20	24.5	17:16	15:15-19:19	A01-A17, B02, B12, B14
7/23	27.5	7:20	5:41-9:54	A01-A17, B01-B15
7/26	0.9	9:35	7:38-11:38	A01-A17, B02, B12, B14
7/30	4.9	11:36	10:01-12:57	A01-A17, B01-B17
8/5	10.9	4:15	5:13-8:16	A01, A03, A10, B02, B12, B14
8/8	13.9	7:51	6:10-8:59	A01-A17, B01-B15
8/16	21.9	13:56	12:50-15:01	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
8/20	25.9	6:24	5:28-7:21	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
8/25	1.3	9:50	8:07-11:45	A01-A17, B02, B12, B14

測点を含む広域観測からなり、定線上のデータは1週間に2回、広域のデータは1週間に1回の頻度となるよう実施した。観測には1隻ないし2隻の漁船を使用し、可能な限り満潮をはさんだ4時間の間に実施した。主要な観測項目は水温、塩分、クロロフィルa蛍光、濁度、溶存酸素濃度(DO)であり、YSIナノテック製YSI-600QS、アレック電子製Compact-STD、およびAAQ-1183を使用した。また、同時に採水を行い、SS、栄養塩等の分析も行った。多項目水質計は一定速度で降下・上昇させてデータを取得し、水温、塩分、クロロフィルa、濁度については降下時の値を採用した。DOについては鈴木ら⁶⁾の方法によって降下・上昇両方のデータから値を求めた。

船舶観測と並行して、図-1に示すSx1, Sx2, S3, Txの4点において、2006年6月26日から8月30日までの間、係留観測を行った。主要な観測項目は超音波流速計による流速鉛直プロファイルと水位、表層・底層の水温・塩分、濁度(一部底層のみ)、クロロフィルa(一部表層のみ)である。使用した機材はNortek社製Aquadopp Profiler、ア

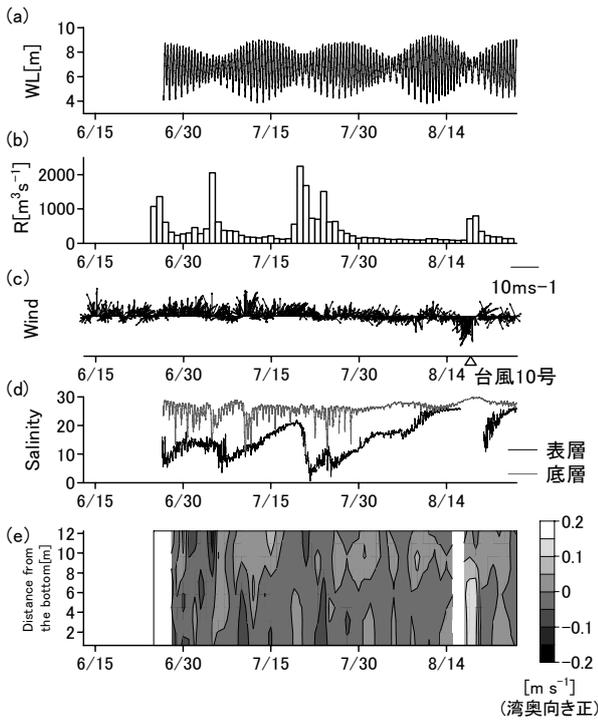


図-2 Sx2の潮位(a), 筑後川瀬の下の日平均流量(b), 佐賀の風向・風速(c), Sx2の表層・底層塩分(d), Sx2の残差流(e).

レック電子製 Compact-CTW, Compact-CT, ATU3-8M, ATU5-8M, ACL104-8M, MTB-8M2である.

3. 観測結果と考察

(1) 概況

図-2にSx2の潮位, 筑後川瀬の下の日平均流量, 佐賀の風向・風速, Sx2の表層・底層塩分, Sx2の残差流鉛直プロファイルの時間変動を示す.

観測期間中には大潮・小潮サイクルが約4回含まれていた(図-2a). 観測開始直前から7月下旬までに3回の大出水があり(図-2b), 強い塩分成層が発達した(図-2d). また, 表層の塩分低下に伴い, Sx2表層では一時的に強い沖向きの残差流が見られた(図-2e). 大出水が相次いだため塩分成層は大潮を越えて持続し, 8月中旬の大潮にいたって初めて解消した(図-2d).

観測期間前半は南よりの風が吹き, その後風は弱くなったが, 8月下旬には台風10号が通過し, 強い北風が連吹した(図-2c). このとき底層に強い流入傾向の残差流が見られた(図2-e). また, 底層での塩分が顕著に上昇した(図2-e).

(2) 河川プリュームの発達とSSの輸送

図-3上に, もっとも大きい出水のあった7月20日およびその3日後, 6日後の表層塩分の水平分布を示す. 7月20日には筑後川河口付近に偏在していた河川水が, 3日後には湾の岸に沿って広がって竹崎島沖に到達し, 6日後には有明海奥部全域が低塩分化している. これは, 筑後川から供給された河川水がまず岸を右に見る方向に進行し, その後河口沖にバルジが発達して有明海奥部全体を覆ったことを示している. 表層塩分の低下に伴いSx2表層で見られる沖向きの残差流は, 岸を右に見て進行する河川プリュームの先端がSx2を通過したために起こったものであると考えられる. なお, 山口・経塚⁷⁾は浅海定線調査データを用いて, 流量増大後有明海奥部西側表層が強く低塩化することを示唆しており, この結果と符

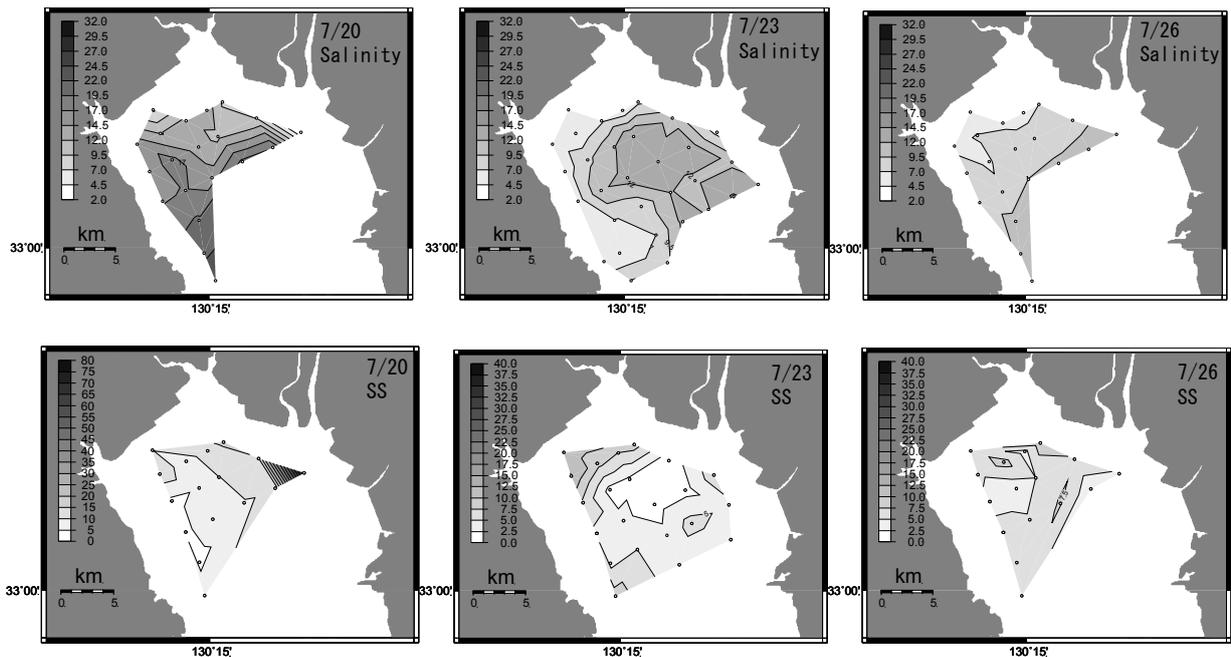


図-3 7/20, 23, 26日の表層塩分(上)および表層SS(下).

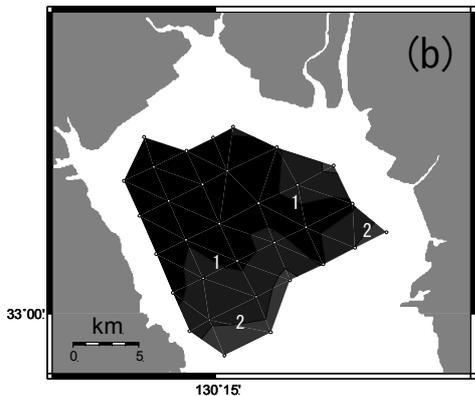
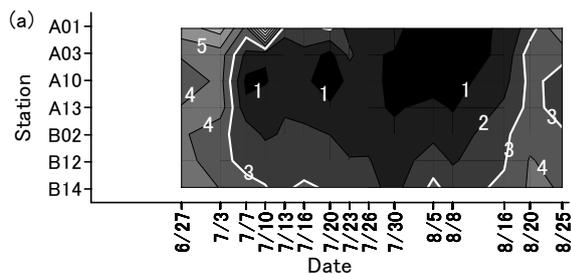


図-4 定線上の底層D0の変動(a)及び8/8の底層D0の水平分布(b).

合する。

図-3下に、7月20、23、26日の表層SSの水平分布を示す。図-3上と比較すると、全体的に塩分の低いところでSSが高く、特に23日には西側に発達した低塩分水塊の形に対応してSSが高濃度となっている。これは、7月20日の大出水によって海域にもたらされた表層のSSが、河川プリュームの発達に伴って有明海奥部西側に輸送される経過を捉えたものであると考えられる。

(3) 沿岸湧昇

台風10号通過時にSx2で見られた底層の流入傾向の残差流と塩分の顕著な上昇は、浅いため欠測となったSx1

を除く他の観測点でも見られた。これは、北風の連吹により沿岸湧昇が起こり、高塩分の海水が沖側から進入してきたことを示唆する。

(4) 貧酸素水塊の消長

図-4aに定線上の底層D0の時系列を示す。貧酸素水塊(本稿ではD0 3mg L⁻¹以下とする)は7月7日の観測で初めて見出され、塩分成層が長期にわたり維持されたため大潮時にも貧酸素状態は解消せず深刻化した。速水³⁾によれば有明海奥部の貧酸素水塊形成のメカニズムには河川流入の多少によって(1)小潮期に沖側から底層に貫入した高塩分の海水が停滞することにより貧酸素化する(2)大量の河川流入によって海域全体が強く成層しその下で貧酸素化が進行する、という二つのパターンがある。2006年は河川流量が多い年に見られる(2)のパターンに相当していたと考えられる。

その後貧酸素水塊は台風10号通過に伴い解消した。これは、台風によって沿岸湧昇が引き起こされ海水の交換が活発になったこと、風波によって鉛直混合が促進され、酸素が底層側に供給されたためと考えられる。

なお、2006年の貧酸素水塊は過去最悪レベルのものであった⁸⁾。図-4bに最も激しい貧酸素状態が観測された8月8日の底層D0の水平分布を示す。有明海奥部ではもっぱら西側の海域で貧酸素水塊が見られることが多いが、このときは筑後川河口沖まで貧酸素水塊が広がっていた。

4. 数値モデルによる河川プリュームの挙動の

シミュレーション

(1) FVCOMIについて

FVCOM[®]はC. Chenらによって開発・公開されている、有限体積法による海洋数値モデルであり、以下の特徴を持つ。

- 水平方向に三角形格子を使用しており、解像度

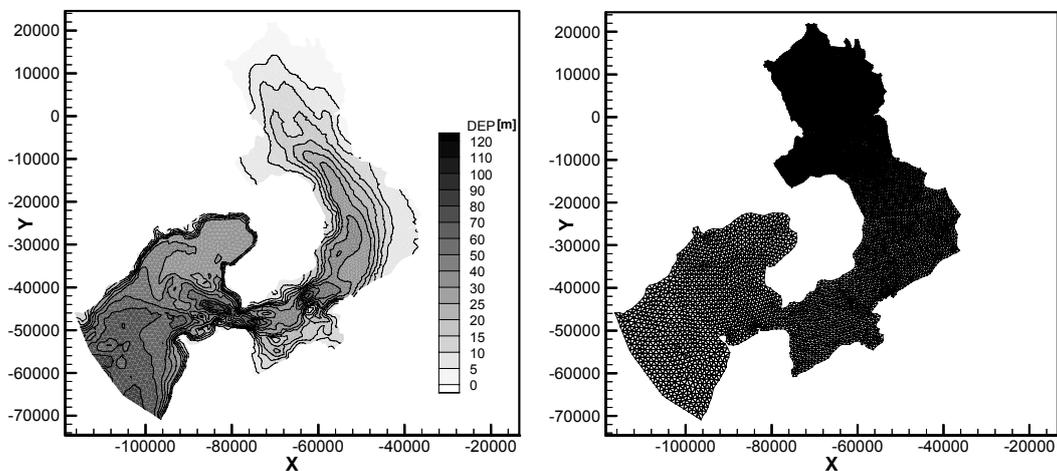
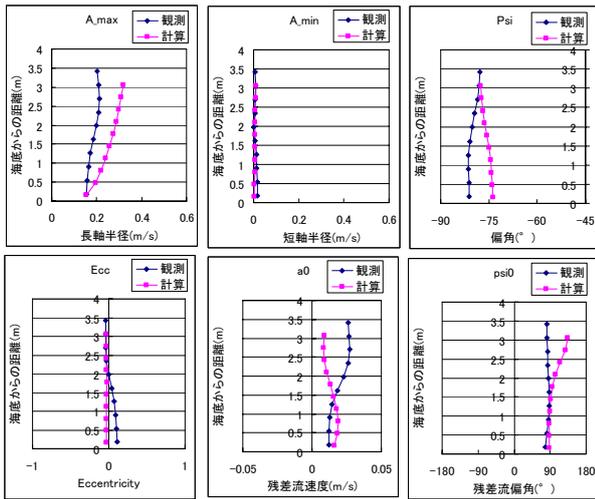
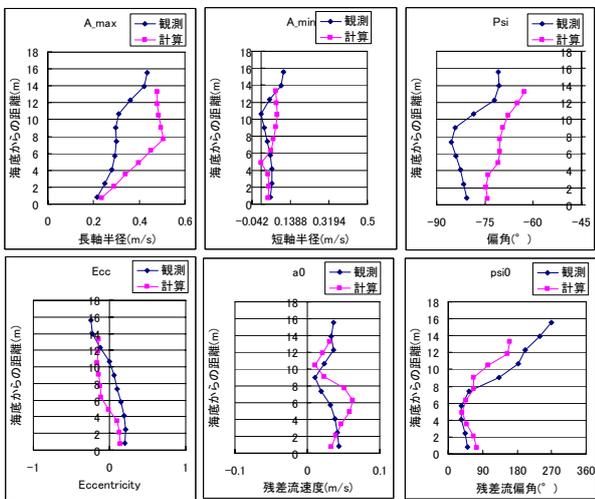


図-5 計算領域と格子



(a) Sx1



(b) Tx

図-6 Sx1およびTxにおける M_2 潮流楕円および残差流諸要素

にたいする自由度が高い。

- 鉛直方向に σ 座標を使用しており、海底地形の表現に優れている。
- 干潟を考慮した移動境界計算機能を標準で有している。
- 公開された数値モデルであり、閲覧、使用に制限が少ない。
- 乱流モデルライブラリGOTMが組み込まれていること、USGSによるsediment transport modelが導入されていることなど、公開モデルの長所を生かした開発が行われている。

こうした特長を考慮し、筆者らは本研究にFVCOMを導入することとした。

(2) 計算条件等

図-5に、計算領域と格子を示す。地形データは、藤原ら⁹⁾がJ-BIRD、J-EGG500等をベースに作成したものを使用し、有明海奥部の格子サイズが約500mとなるように

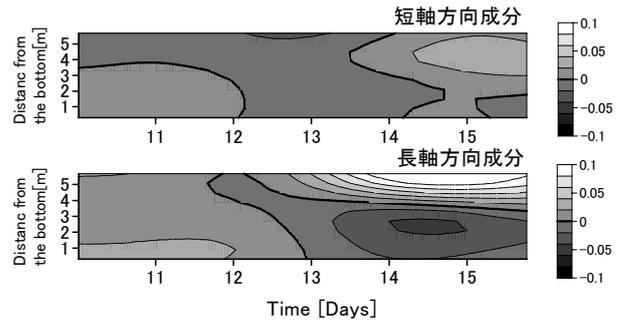


図-7 Sx2における河川プリューム発達に伴う残差流変動の計算結果(太線は 0 m s^{-1})

格子を生成した。鉛直方向は10層とし、等間隔に分割した。潮汐は M_2 分潮のみを考慮した。初期値には有明沿岸4県の浅海定線調査および長崎県の沿岸定線調査の7月の平均値を補間したものを使用した。

(3) 潮流、残差流の再現性について

図-6に、計算開始後14日のSx1, Txにおける M_2 潮流楕円の長軸半径、短軸半径、偏角、位相、および残差流の大きさと偏角を観測結果と比較したものを示す。Sx1は平均水深が3mと浅いにも関わらず、 σ 座標を用いているため十分な解像度が確保されている。また、底層での流速がよく再現されていることがわかる。Txにおいても底層の流速がよく再現されている。また、残差流の鉛直構造は観測と計算でよく一致している。

(4) 河川プリュームの発達に伴う残差流場の変化

前述のように、有明海奥部の河川プリュームの発達とそれに伴う残差流場の変化は有明海の物質輸送メカニズムに大きな影響を与えていると考えられる。そこで、梅雨明けの大出水を想定し、河川流量を変動させた計算を行った。

今回は流入河川としては筑後川のみを考慮し、平水時の流量を $150\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ 、出水時の最大流量を $2000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ とした。また、流量の時系列は $\mu=14$ (日)、 $\sigma=1$ (日)のGauss分布と相似な形状をなすものとした。

図-7に、Sx2における長軸、短軸方向の残差流の時間変動を示す。観測では、河川流量増大に伴って、Sx2表層で残差流が流出傾向となっていた。しかし、計算では、河川流量増大時にむしろ表層で流入傾向となっていた。

図-8に、河川流量増大3日後の表層・底層塩分分布を示す。観測(図-3左中)ではプリュームの先端が岸を右に見る方向に発達している様子が見られたが、計算結果では見られない。岸向きの残差流は、むしろバルジの内部にできる時計回りの渦に対応したものと考えられる。

このように計算と観測に違いが生じた理由のひとつとして、潮汐の振幅の違いが考えられる。計算では M_2 潮汐のみを与えているので、中潮に近い条件である。一方、河川流量が最大となった2006年7月20日は小潮であり、

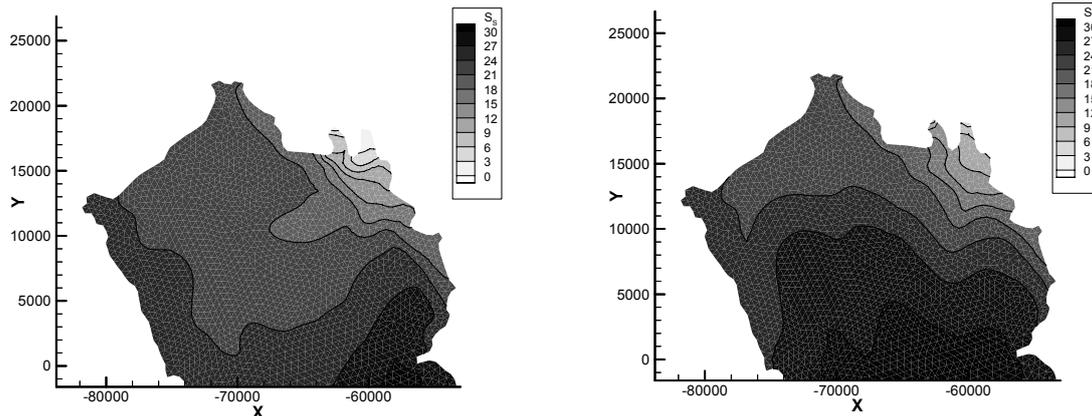


図-8 河川流量最大の3日後の表層(左)・底層(右)塩分分布計算結果

擾乱が小さかったため、明瞭なプリュームが形成されやすく、また西側の海域はバルジの影響をうけにくかったのかもしれない。

謝辞：

観測を行うにあたっては、藤井一文氏(白石北明漁業協同組合)、いであ株式会社にご協力いただいた。また、筑後川河川事務所には超音波流速計を、国土技術政策総合研究所河川研究室には濁度計を、愛媛大学沿岸環境科学研究センター環境動態解析分野にはクロロフィル濁度計を、九州大学工学研究院 環境都市部門沿岸域環境学講座には水温・塩分計を使用させていただいた。ここに感謝する。

長期かつ広範囲にわたる船舶観測にあたっては佐賀大学内の多くの人々に参加、協力いただいた。佐賀大学理工学部都市工学科 野口剛志技官ならびに大串研究室の学生の皆さん、有明海総合研究プロジェクト 田端正明教授ならびに田端研究室の学生の皆さん、有明海総合研究プロジェクト 瀬口昌洋教授ならびに瀬口研究室の学生の皆さん、有明海総合研究プロジェクト 加(槻木)玲美研究員に深く感謝する。

数値モデルの初期値に使用した浅海定線調査、沿岸定線調査データは佐賀県有明水産振興センター、福岡県水産海洋技術センター有明研究所、長崎県総合水産試験場、熊本県水産研究センターから提供を受けたものである。瀬の下における日平均流量は筑後川河川事務所より提供を受けた。佐賀における風データは気象庁により取得されたものである。地形データは海上保安庁海洋情報部により整備されたものを使用した。関係者各位に感謝する。

なお、本論文中の図の一部はGMT (Generic Mapping Tools) を使用して作成されたものである。

参考文献

- 1) 濱田孝治・経塚雄策：有明海湾奥における循環流とその変動について、海の研究(印刷中)。
- 2) 宮原明子・田井明・重田真一・齋田倫範・矢野真一郎・小松利光：筑後川から有明海に流入した河川水の挙動に関する現地観測，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 287-288，2007。
- 3) 速水祐一：有明海の貧酸素水塊 - 形成機構と長期変動 - ，月刊海洋，39(1)，pp. 22-28，2007。
- 4) 有明海・八代海総合調査評価委員会 - 中間取りまとめ-，2006
- 5) Chen, C., Beardsley, R.C. and Cowles, G.: An Unstructured Grid Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM User Manual, 2nd ed. 2006.
- 6) 鈴木伴征・鶴田泰士・石川忠晴：河川・湖沼等におけるD0空間分布の高速計測，水環境学会誌，21(7)，455-459。
- 7) 山口創一・経塚雄策：浅海定線調査資料を用いた有明海湾奥の貧酸素水塊，2006年度 日本海洋学会秋季大会講演要旨集，p. 120，2006
- 8) 濱田孝治・速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一・山田裕樹：2006年夏季の有明海奥部における大規模貧酸素化，海の研究(投稿中)。
- 9) 藤原考道・経塚雄策・濱田孝治：有明海における潮汐・潮流減少の原因について，海の研究，13(4)，pp. 403-411，2004。

(2007. 3. 19受付)

有明海湾奥部の残差流分布観測並びに 土地利用GISを用いた筑後川流域の流出解析

OBSERVATIONS OF RESIDUAL CURRENT DISTRIBUTION IN THE
INNERMOST PART OF THE ARIAKE SEA AND RUNOFF ANALYSES OF THE
CHIKUGO RIVER BASIN USING LAND USE GIS

大串浩一郎¹・速水祐一²・濱田孝治³・山本浩一³・平川隆一⁴・鶴田芳昭⁵

Koichiro OHGUSHI, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA,
Koichi YAMAMOTO, Ryuichi HIRAKAWA and Yoshiaki TSURUTA

¹博士 (工学) 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²博士 (農学) 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³博士 (工学) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴博士 (工学) 佐賀大学助手 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁵工修 (株)東京建設コンサルタント次長 九州支店技術第3部 (〒810-0801 福岡市博多区中洲5-6-20)

Residual currents distribution of spring tide in summer in the innermost part of the Ariake Sea was observed by using ADCP and it was considered together with other observation results obtained in a previous fiscal year. The estuarine circulation was dominated in all cases and a residual current distribution of spring tide was found to be similar to that of neap tide in summer.

Secondly, a GIS technique was utilized to understand temporal changes of land use in the Chikugo River Basin. Especially, upstream basin (Ogase Basin) was selected to have runoff analysis with the land use analysis by the GIS so that the land use change in fifty years in this area was found to result in the effect of runoff characteristics significantly. Recent growth of the forest leads to reduce flood peak effectively.

Key Words: residual current, Ariake Sea, estuarine circulation, ADCP, summer spring tide, Chikugo River Basin, land use, GIS, runoff analysis

1. はじめに

有明海における物質循環に大きな影響を与えると考えられる残差流の分布については、現在までにあまり観測例が報告されていない。昨年度、著者らはADCPを用いて有明海湾奥部における残差流分布を観測し、その結果を報告した。その結果、いずれの観測日においてもエスチュアリー循環が卓越していることと、秋季以外は表層の厚さが薄く、2層あるいは3層構造を伴ってエスチュアリー循環の構造に複雑な流速分布が加わっていることが分かった。平成18年度は、夏季大潮期に同様のADCPによる流れの観測を実施し、上記の観測結果と併せて考察を行った。

また、陸域から有明海への影響という観点で、昨年度は、人工衛星画像を用いて筑後川流域の約20年に渡る土地利用変遷の解析を行った。今回、航空写真のデータか

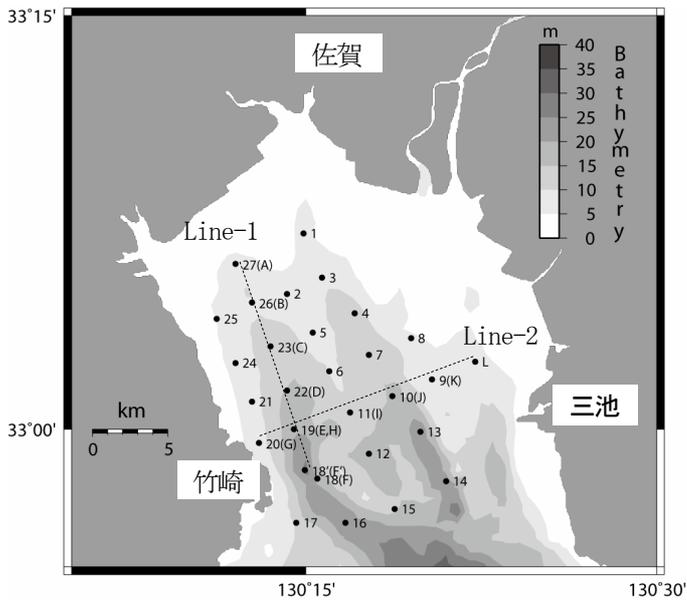
ら約50年間の同地域の土地利用変遷をGIS (地理情報システム) により解析し、また同時に、同地域上流域の小ヶ瀬地区において、タンクモデルによる流出解析を行い、土地利用状況の変化が流出特性にどのような影響を与えるのかについて考察を行った。

本研究では、以上のように、有明海湾奥部における残差流分布に関する観測ならびに土地利用GISを用いた筑後川流域の流出解析について結果を報告する。

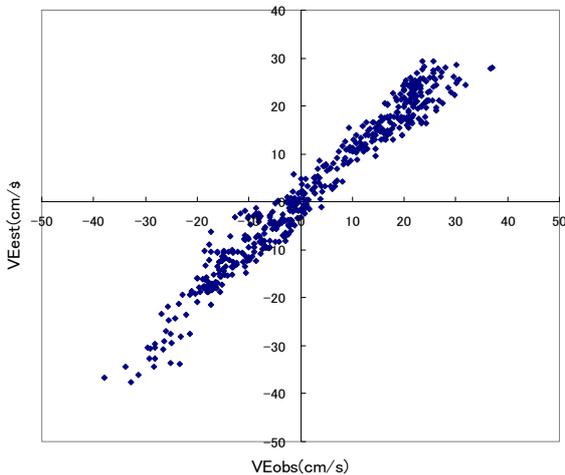
2. 有明海湾奥部における残差流の観測

(1) 観測方法

2006年7月12日 (大潮) に、図-1のLine-1に沿ったA点~F点の6地点において順次13時間にわたりADCPによる流速測定を実施した。なお、図中のLine-1及びLine-2は、2005年11月1日 (大潮) にADCPによって観測した測



図一 有明海湾奥部におけるADCPとCTDによる観測地点



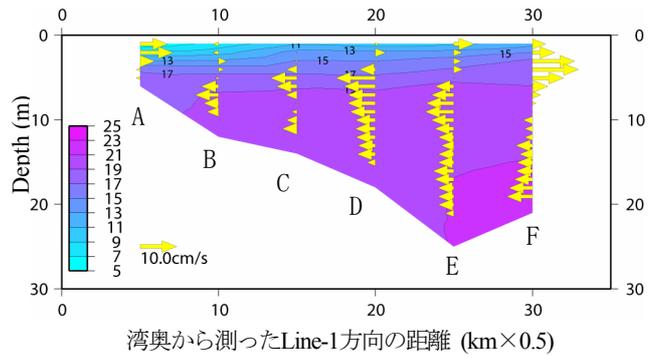
図一 2005年7月15日に測点Eで観測された潮流と調和解析で求めた推定値の散布図。相関係数は0.981。
(横軸：観測値，縦軸：推定値)

線も示している。ADCP船は、各測点で停止し、RD Instruments社製Workhorse(1200kHz)により、流速の鉛直プロファイルを一時間測定の後、CTD(アレック電子製Compact CTDとYSIナノテック製600QS)による水温、塩分等の鉛直プロファイルも同時に観測した。さらに、表層採水し、栄養塩濃度の分析を行った。この測線に沿った観測では、2時間につき1往復のスピードの測定を合計6.5往復実施した。

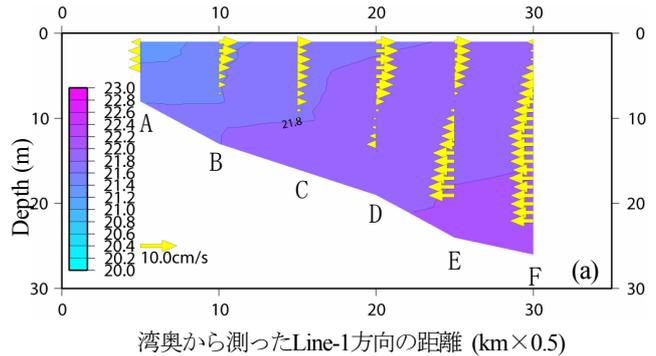
以上のようなADCPによる流速測定は、昨年度には、2005年7月15日(小潮)、2005年11月1日(大潮)並びに2006年3月10日(中潮)の3回実施している。これらの観測結果と併せて考察することとする。

(2) 観測結果と考察

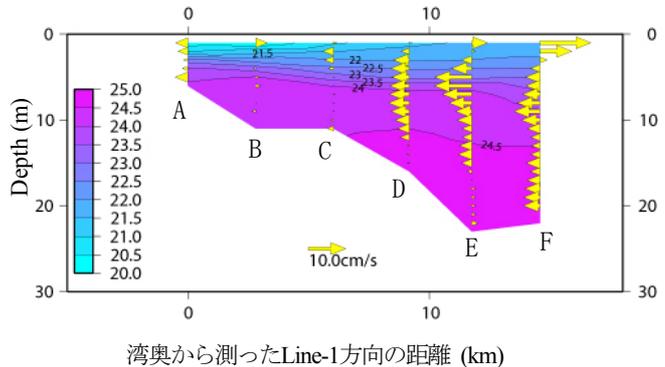
図一 2は、2005年7月15日(小潮時)のADCPによる潮流の観測結果を用いて調和解析により半日周潮成分を除



図一 2 Line-1方向の残差流と海水密度の鉛直分布；(2005年7月15日)



図一 4 Line-1方向の残差流と海水密度の鉛直分布(2005年11月1日)



図一 5 Line-1方向の残差流と海水密度の鉛直分布(2006年3月10日)

去して得られた残差流水平成分の鉛直面内分布である。図中には同時に海水密度(σ_t)を色分けによって示している。なお、調和解析の精度を検証するため、図一 3に、測点Eにおける潮流そのものの観測値と、調和解析(最小二乗法)で求めた潮流の散布図を示している。相関係数は0.981であった。なお、測点A、Fなどの端点は観測点が少なかったにも関わらず、相関係数は0.97を上回っており、十分に観測値を説明できる精度であることが分かった。図一 2によれば、Line-1に沿った鉛直面内の残差流分布は、上層流出、下層流入の2層構造を示している。また、海水密度は強く成層しており、残差流の方向が変わる水深約5mにおいて明瞭な密度躍層を呈している。

図一 4には、同様に2005年11月1日(大潮時)のLine-

1に沿った方向の残差流と海水密度の鉛直分布を示している。残差流は2層構造、すなわち、夏季と同様に上層流出、下層流入の形態をとっている。

図-5には、2006年3月10日に観測し得られたLine-1に沿った残差流と海水密度の鉛直プロファイルを示している。測点Eの残差流分布を見ると、水深3m~15mに渡って岸向き流速（湾奥向き流速）が正の値を示し、その上下で負の値を示して、いわゆる中層に流入する3層構造が現れていることが分かる。これは、沖合から入ってくる海水の密度が湾奥の下層部より小さいために起こっているものであると考えられる。

図-6に、以上の3時期に加えて今回観測した2006年7月12日（大潮）の残差流分布の詳細を示している。特徴的なのは、非成層期の11月には上層流出、下層流入の流速分布が綺麗に平行に並んでいることと、一方で、成層していた7月と3月には、上層流出と中層流入が現れ、より複雑な構造となっていることが分かる。また、2005年7月15日（小潮）と2006年7月12日（大潮）は、大潮、小潮という違いが残差流の分布という形には表れておらず、極めて似た残差流分布を示していることが興味深い。この7月の残差流分布については、濱田らによる2006年夏の繫留観測結果からも同様の分布が表れており（図-7）、有明海湾奥部のLine-1に沿った残差流の鉛直分布としては、典型的なものであると結論づけることができる。

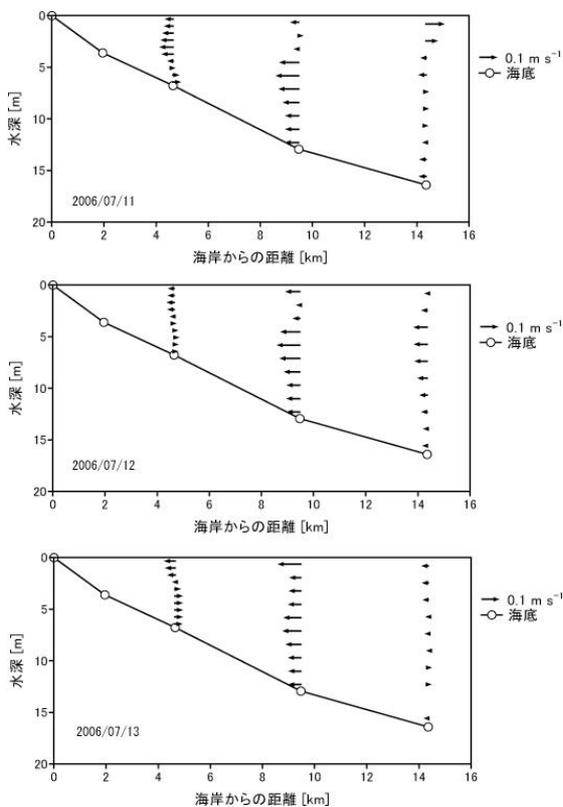


図-7 2006年7月11日~13日の各25時間平均の残差流分布観測結果（濱田らの繫留観測結果の一部）

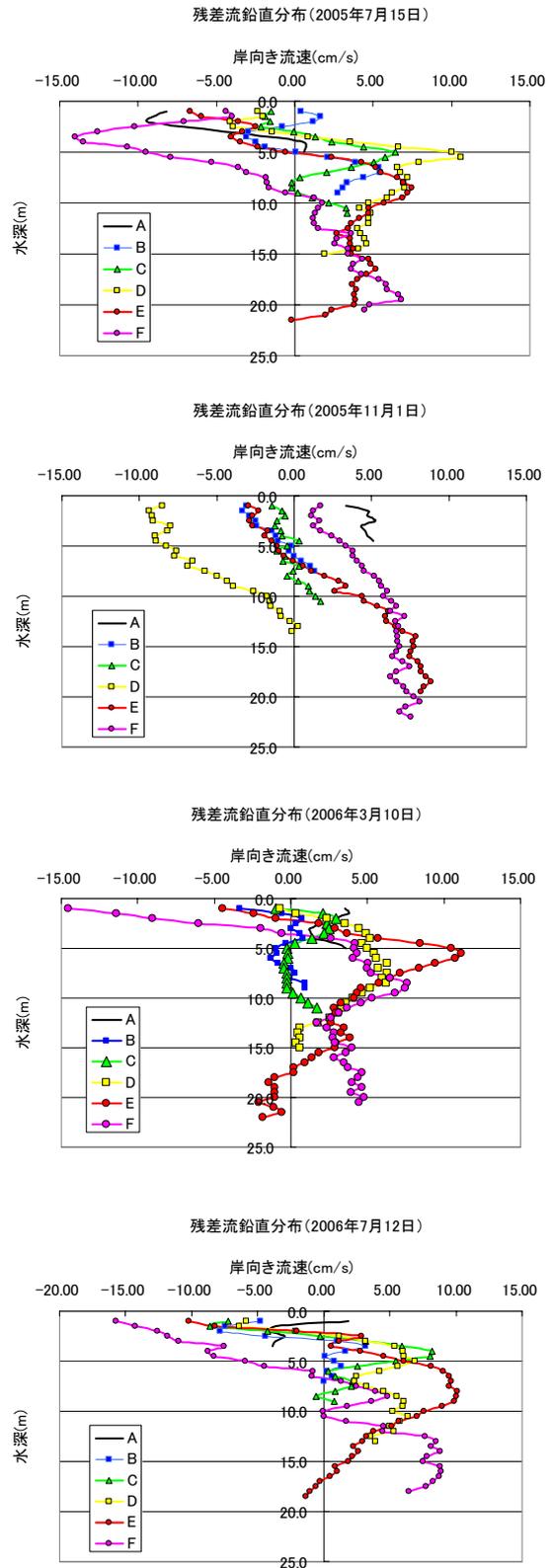


図-6 2005年7月15日（小潮）、11月1日（大潮）、2006年3月10日（中潮）並びに2006年7月12日（大潮）時のLine-1方向の残差流の鉛直分布（A点が最奥部、F点が最も沖合地点）

3. 土地利用GISを用いた筑後川流域の流出解析

(1) 解析方法

九州最大の河川である筑後川は、幹川流路延長143km、流域面積2,860km²に及び、陸域から有明海への寄与としては大きな割合を占める。本研究では、ESRI社のArcGIS9.1を用いて筑後川流域の土地利用の把握と流域分割を行った。研究に用いた資料は、国土地理院の流域自然環境調査作業報告書などである。国土地理院の報告書では、航空写真などのデータを元に昭和23年、昭和50年、平成17年のそれぞれの土地利用状況の変遷を調査している。本研究では、筑後川流域の雨量観測所、流量観測所などの位置（これも経年的に場所が変化している）や土地の標高データなどをもとに流域を分割し、それらをGISで一元的に管理することとした。

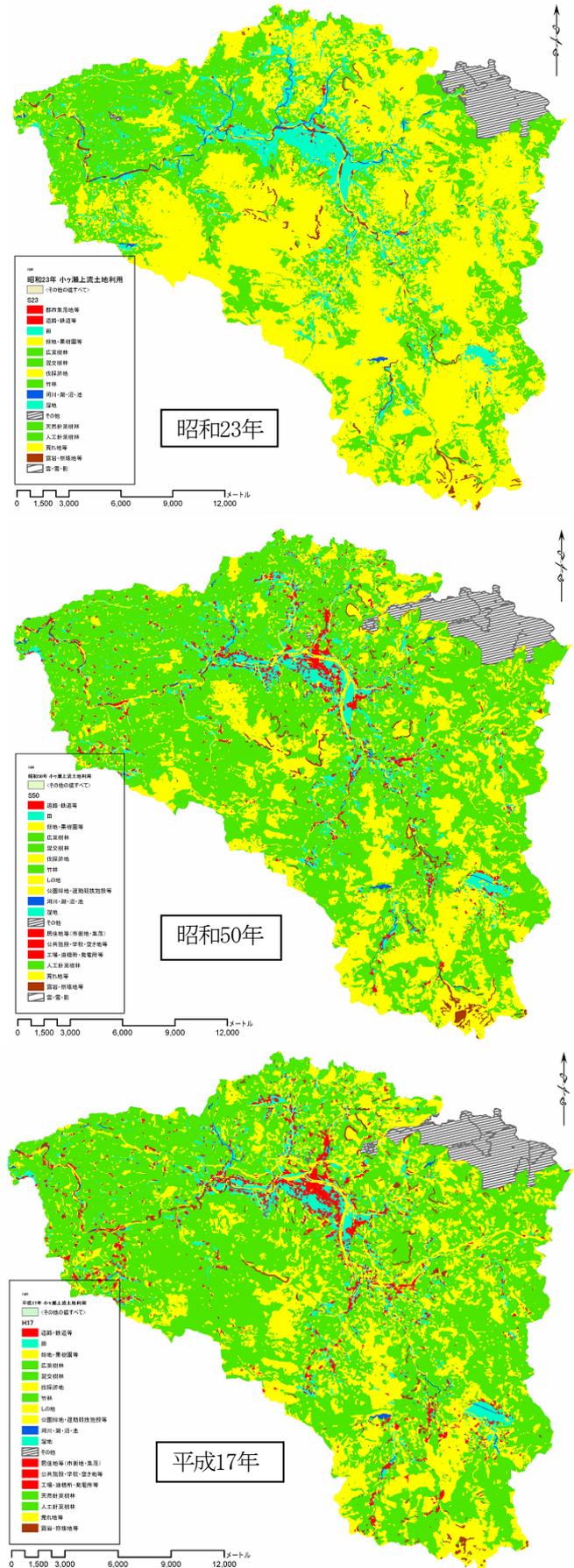
流域分割後に、上記のデータを元に流出解析の対象地区として小ヶ瀬流量観測所より上流の流域（流域面積＝527.6km²）を選定した。小ヶ瀬より上流では、昭和23年から平成17年にかけての土地利用の変化が大きく、また、ダム等の治水、利水施設が建設されていないため、土地利用の変遷による流出の変化をみることができると考えたからである。選定した土地のある年に対応する流出解析を行い、他時期で似た降水量を当てはめ、実際の流量と比較した。なお、土地利用状況の把握に昭和23年、昭和50年、平成17年の3時期のデータを用いた。流出解析手法としてはタンクモデルを用いた。なお、蒸発散量についてはゾーンズウェイト法により見積もった。

(2) 土地利用分類の解析結果

図—8に小ヶ瀬流量観測所より上流の流域（ここでは小ヶ瀬地区と呼ぶことにする）の上記3時期の間の土地利用状況の変遷を示す。土地利用の分類としては大まかに森林・竹林（緑）、畑地・荒地・草地など（黄色）、水田・湿地など（水色）、河川・沼地など（青色）、住宅地・道路など（赤色）などとした（実際にはもっと多くの分類がされている）。この流域の土地利用分布割合の変遷を表にまとめたのが、表—1である。表によれば、小ヶ瀬地区では昭和23年の畑地・荒地・草地の割合が大きいことが目立つ。一方、森林・竹林の割合は逆に増加しており、終戦直後の国土の荒廃が昭和23年にはまだ残っていたことが窺える。また、この時期は台風や梅雨前線による水害が多発していたことが記録から分かっている。

表—1 小ヶ瀬地区の土地利用分布割合の変遷(%)

	昭和23年	昭和50年	平成17年
森林・竹林	35.4	58.8	60.1
畑地・荒地 地・草地	49.1	25.1	23.6
水田・湿地	10.5	8.8	7.6
その他	5.0	7.3	8.7



図—8 小ヶ瀬地区の土地利用状況の変遷（上から昭和23年、昭和50年、平成17年）

(3) タンクモデルによる流出解析結果

次に、対象流域に対するタンクモデルによる流出解析であるが、昭和20年代の流量観測記録はないため、対象洪水を昭和33年、昭和53年並びに平成14年の3洪水として解析を行った。それぞれの年代の流域平均雨量を求めるため、当时に存在した雨量観測所の場所をもとにティーセン分割（ボロノイ分割）をGIS上で行った。昭和33年の場合は、4つの雨量観測所が対象流域に関係していた。一方、昭和53年・平成14年は7カ所であった。後者のティーセン分割後の影響範囲を図-9に示す。

用いたタンクは直列4段のタンクであり、それぞれの洪水ハイドログラフを再現できるようなタンクのモデル定数を試行錯誤で求めた。得られたタンク定数は、図-10に、流出解析結果を図-11に示す。

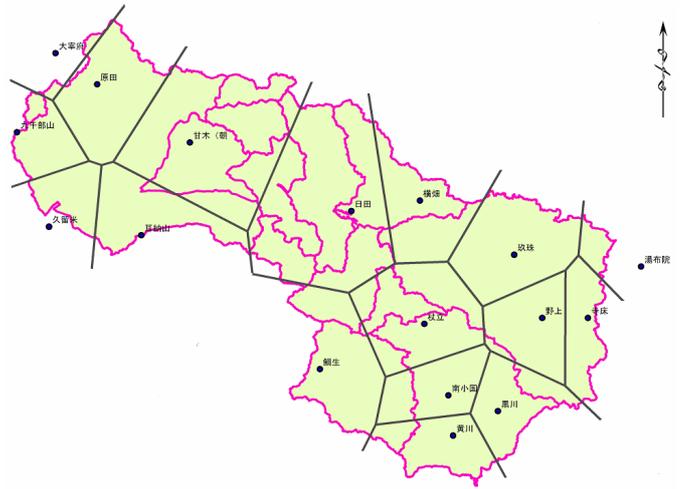


図-9 流出解析用ティーセン分割図
(上は昭和33年, 下は昭和53年・平成14年用)

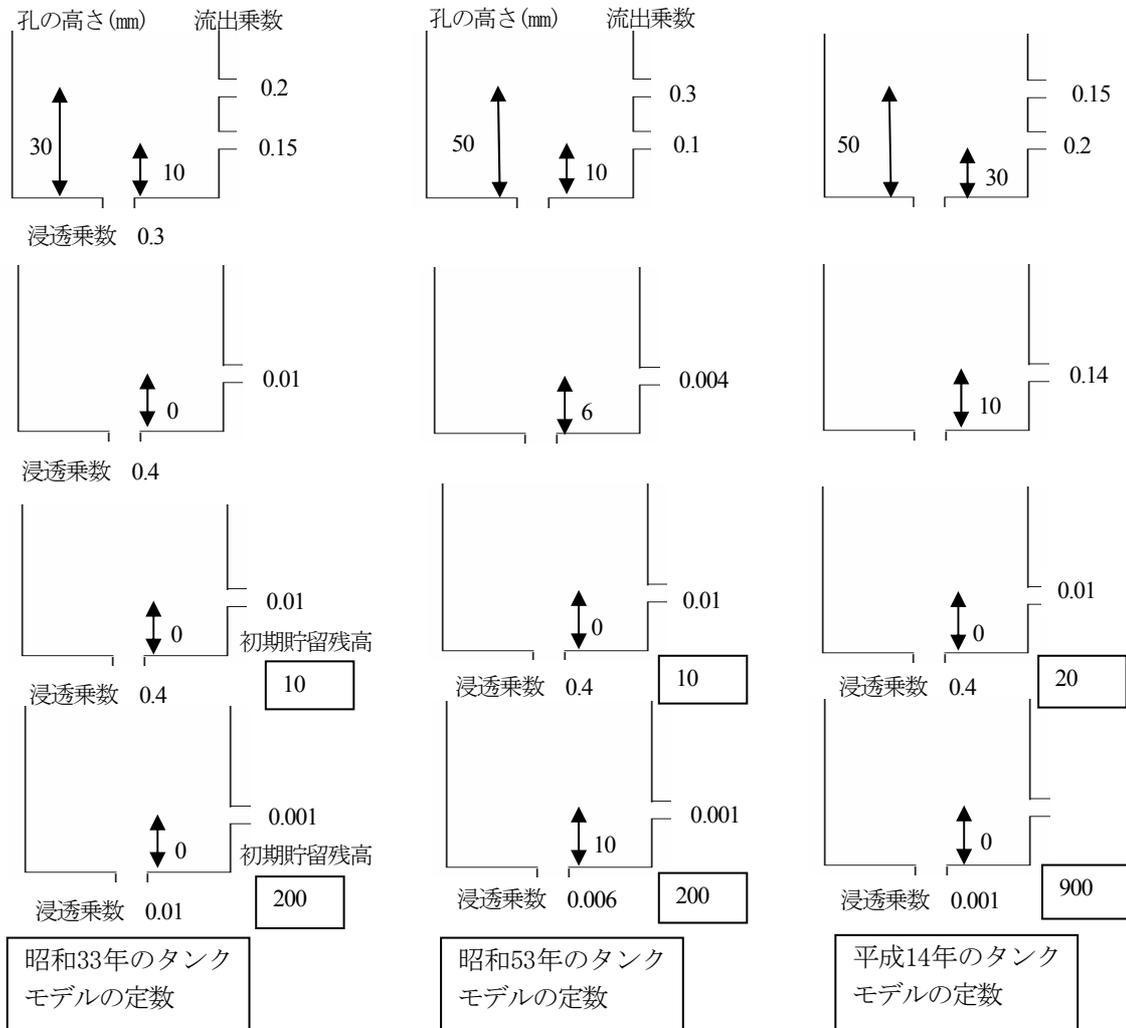


図-10 得られたタンクモデルの定数（昭和33年，昭和53年並びに平成14年）

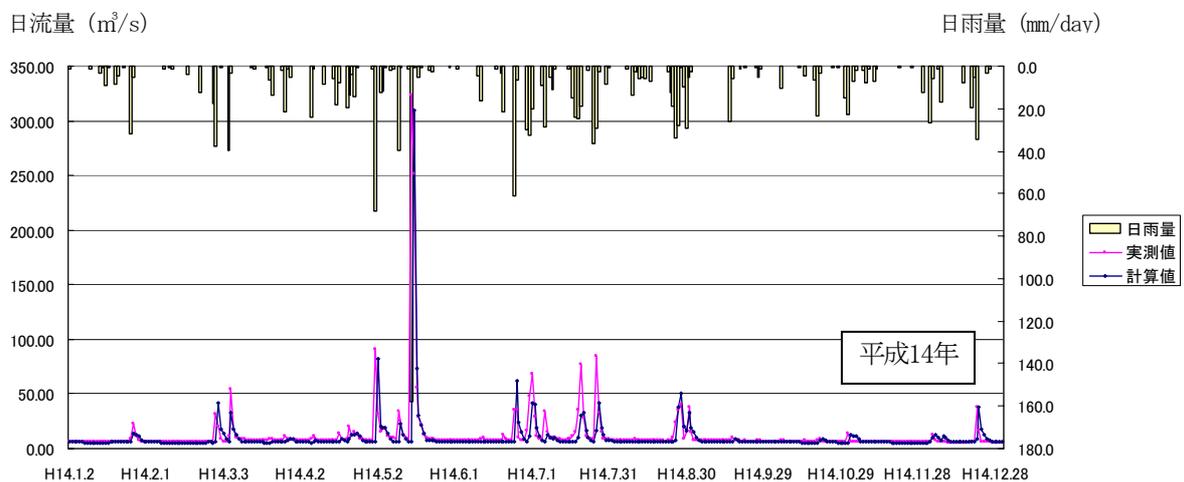
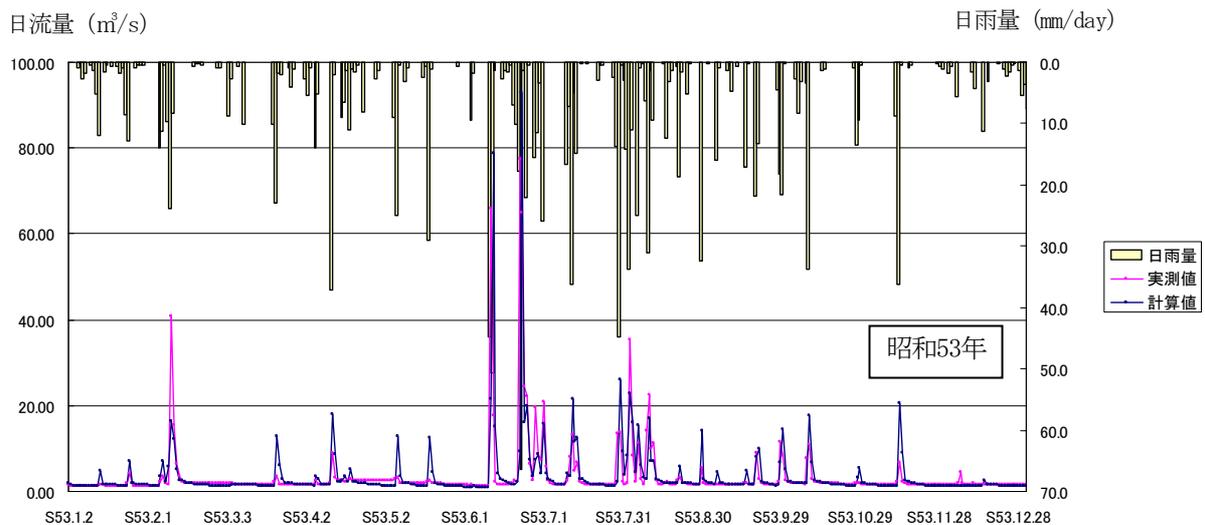
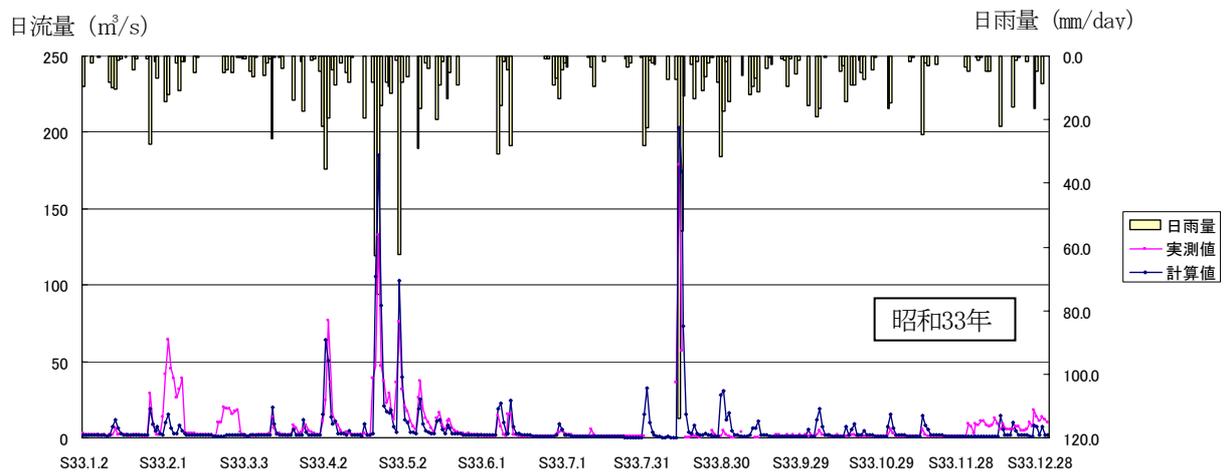


図-11 タンクモデルによる流出解析結果（上から昭和33年，昭和53年，平成14年）
赤は実測値，青は計算値を表す。

4. 考察

図-11に示すように，タンクモデルによりそれぞれの流量ハイドログラフが精度良く再現されているのが分かる。ここで，図-11のようなモデル定数が得られたことについて若干考察することにする。図-12は，

土地利用GISによって求められた昭和23年，昭和50年並びに平成17年の土地利用割合の解析結果を小ヶ瀬地区ならびに筑後川全流域についてまとめたものである。これを見ると，特に昭和23年の森林の割合が低く，中でも上流域の小ヶ瀬地区で森林の割合が少ないことが分かる。一方，荒れ地は小ヶ瀬地区で昭和23年に割合

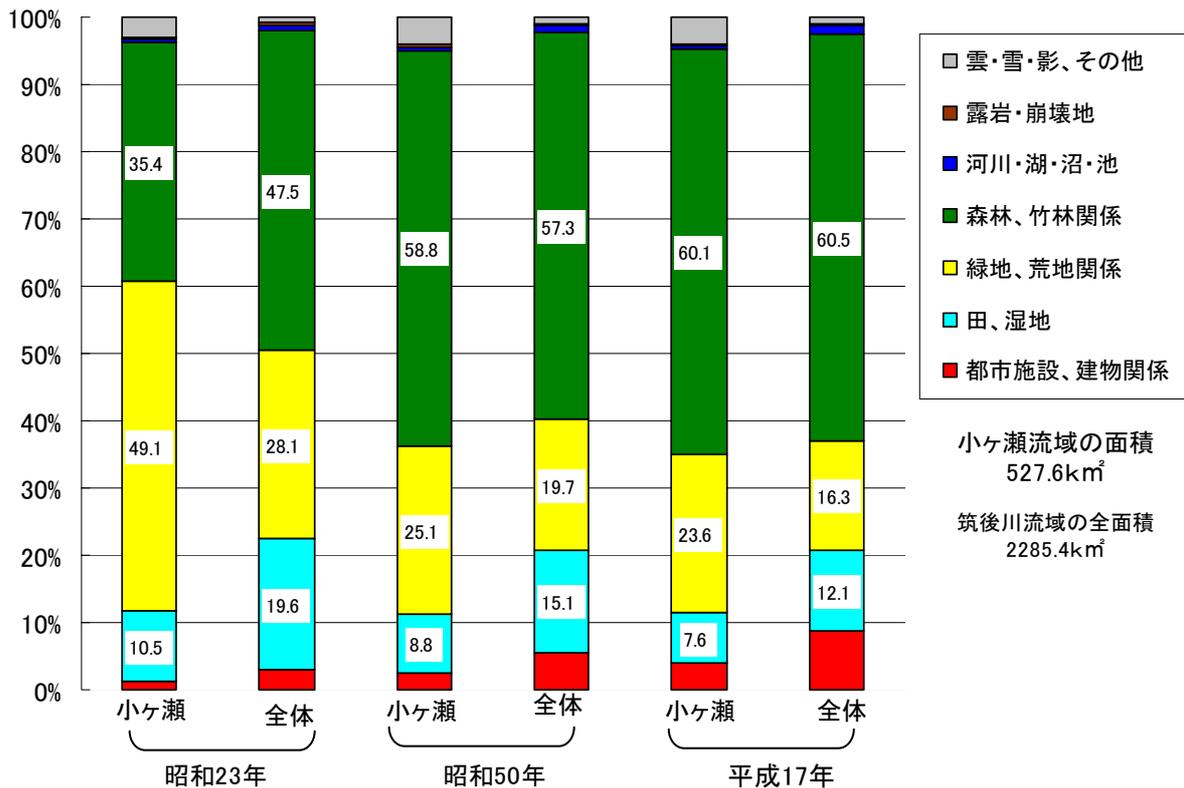


図-12 GISより得られた小ヶ瀬より上流域と筑後川流域全体それぞれの土地利用割合の変遷

が高く、ちょうど森林の割合と入れ替わっている構造にある。また、昭和50年と平成17年の比較では森林の割合はほとんど変わっていないが流域全体としては住宅地や道路などの都市域が徐々に増加し、それを補うために水田や湿地の割合と荒地の割合が若干減少してきている。一方、図-10において、最上段タンクのモデル定数は、孔の高さが徐々に高くなり、流出孔の大きさは小さくなっている。第二段タンクでは、孔の高さは徐々に高くなってきているが、孔の大きさはいったん昭和53年で小さくなるが、その後また大きくなっている。第3段タンクのモデル定数は変化が見られない、第4段タンクについては、浸透孔が徐々に小さくなっていることと、貯留量が平成14年では大きくなっていることが分かる。以上をまとめると、洪水時の流出は、年々緩やかな応答をするようになってきている傾向にある。すなわち、森林割合の増加によって引き起こされたものであると結論づけることが可能である。

5. おわりに

本研究の前半では、現地観測をもとに有明海湾奥部の残差流分布の調査結果を示した。その結果、基本的には季節を問わず上層流出・下層流入のエスチャリー循環の流れとなっている、また、夏季の大潮と小潮で

は降水の影響がそれほど大きくなければ残差流の分布はほとんどパターンが同一であることを示した。次に、本研究の後半では、土地利用GISを用いた筑後川流域の流出解析を試みた。その結果、筑後川流域の土地利用変遷とそれが流出特性の変化に与える影響を考察することができた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、海域の現地観測や筑後川のデータ解析のため、大串研究室のメンバーに精力的に協力いただいた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 海上保安庁水路部: 島原海湾の海底地形・底質分布および潮流, 海上保安水路部調査報告, 1959.
- 2) 小田卷実・大庭幸広・柴田宣昭: 有明海の潮流新旧比較観測結果について, 海洋情報部研究報告, 第39号, pp.33-61, 2003.
- 3) 小松利光ら: 北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.341-345, 2004.
- 4) 八木宏・井瀬肇・松村航裕・木元克則: 有明海湾奥部干潟前縁域の流動構造と懸濁態物質輸送特性に関する現地観測, 水工学論文集, 第50巻, pp.1465-1470, 2006.
- 5) 木谷浩三: 有明海における冬季の平均流について, 海と空, vol.78, pp.129-134, 2003.
- 6) 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫: 大阪湾の恒流と潮流・渦,

海岸工学論文集, 第36巻, pp.209-213, 1989.

- 7) 中辻啓二・藤原建紀：大阪湾におけるエスチュアリー循環機構, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.396-400, 1995.
- 8) 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾：ADCPによる伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1096-1100, 1995.
- 9) Fujiwara, T. and Yamada, Y.: Inflow of oceanic water into Tokyo Bay and generation of a subsurface hypoxic water mass, Journal of Geophysical Research, vol.107, No.C5, 13.1-13.10, 2002.
- 10) 高橋裕：河川工学, 1990.
- 11) 国土交通省 河川局ホームページ 百科事典 日本の河川 (http://www.mlit.go.jp/river/jiten/nihon_kawa/index.html)
- 12) 国土交通省 河川局ホームページ 百科事典 水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)
- 13) 国土地理院：流域自然環境調査作業報告書（筑後川上流地区）, 2006.
- 14) 国土地理院：流域自然環境調査作業報告書（筑後川下流地区）, 2006.
- 15) 国土交通省：九州整備局:筑後川水系河川整備計画【大臣管理区間】, 2006.
- 16) 菅原正巳：流出解析法, 1972.
- 17) 榎根 勇：水文学, 1980.

(2007. 3. 19受付)

有明海ノリ養殖場における一潮汐間の 珪藻・渦鞭毛藻類の時空間変動

CONTRASTING DISTRIBUTION OF DINOFLAGELLATE VERSUS DIATOM
DURING A TIDAL CYCLE IN A SHALLOW ESTUARY, ARIAKE SEA

槻木(加)玲美¹・山本浩一²・速水祐一³・谷幸則⁴・吉野健児⁵・濱田孝治⁶
Narumi TSUGEKI-KUWAE, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Yukinori TANI,
Kenji YOSHINO and Takaharu HAMADA

- ¹理博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
²工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
³農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
⁴理博 静岡県立大学学内講師 環境科学研究所 (〒422-8526 静岡市駿河区谷田52番1号)
⁵水博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
⁶工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Tidal current has been regarded as one of the most important factors that influence phytoplankton dynamics in estuaries, where unique aquatic environment have an additional physical energy from tides. Up to now, most of studies have been focused on the dynamics of “whole” phytoplankton biomass using chlorophyll-a, as a maker, that is ubiquitous in all phytoplankton species. However, motile dinoflagellates and passive diatoms could have different strategies to adapt under tidal currents. To investigate the response of different components of phytoplankton community during a tidal cycle in a shallow estuarine, Ariake Sea, we carried out high-frequent observation in 40 minutes intervals at anchored site combined with cross-section observation on 2 December 2005. We measured carotenoids, specific or characteristic pigments for each algal class, using high-performance liquid chromatography, along with salinity, temperature, sigma-t, current velocity and SS. The results revealed that two dominant algae, dinoflagellate and diatom exhibit temporally- and spatially- contrasting distribution patterns to tidal current.

Key Words : *phytoplankton, benthic algae, tidal cycle, dinoflagellate, diatom, HPLC pigment analysis, Ariake Sea*

1. はじめに

有明海湾奥部のような潮汐の影響が大きい沿岸浅海域では、一般に大潮一小潮周期のような潮流の強弱が植物プランクトンの動態を支配する主要な要因の一つと考えられている¹⁾。しかし、これまでのこういった潮流と植物プランクトン動態に関する研究の多くは、クロロフィル-aによる評価が主体で¹⁾、群集構造を考慮に入れた解析は有明海を含めほとんどなされていない。しかしながら、沿岸海域の主要な赤潮形成種である鞭毛藻類と珪藻は、遊泳能力に大きな違いがあり、潮流に対する応答は異なることが予想される。

近年、有明海では潮汐・潮流の変化が議論されており²⁻³⁾、潮流の変化が植物プランクトンの動態に影響を及ぼしている可能性がある。有明海では、秋～

冬季に珪藻による赤潮発生期間が長期化する傾向にあることや⁴⁾、渦鞭毛藻類の発生頻度が増大している⁵⁾。潮流の影響が大きな沿岸海域での赤潮形成種の動態と優占種の変遷解明には、潮流に対する各分類群の応答様式の違いを明らかにする必要がある。しかし、分類群毎にどのような応答を示すのか、その時空間分布の変動を定量的に評価した研究は大変少ない⁶⁾。

さらに近年、珪藻に関して底泥上に生息する底生珪藻類が、潮流や風による底泥の巻上げに伴い水中の基礎生産に一時的に大きく寄与するという事例が報告され⁷⁾、底生珪藻類の機能が注目されている。しかしながら、現時点で基礎生産に対し底生・浮遊性種のどちらの寄与が大きいのか結論は出ていない。

そこで本研究は潮汐振幅の大きな有明海を対象に、1) 赤潮形成種となる珪藻・渦鞭毛藻類の潮流に対す

る時空間分布の変動と、さらに2) 珪藻の中でも底生珪藻類が水中の基礎生産にどの程度寄与するのかを定量的に明らかにする事を目的として、2005年12月の大潮時に海苔養殖が盛んな干潟浅海域で、10時間の連続観測を行った。今回の報告では、植物プランクトンを分類群レベルで定量的に評価できるHPLC（高速液体クロマトグラフィ）による色素分析手法を用いて、まず先の1の目的、主要な一次生産者である珪藻と渦鞭毛藻類の対照的な時空間分布を明らかにしたので、その結果を報告する。

2. 研究方法

(1) 調査概要

有明海湾奥部の干潟—浅海域の計8地点において、2隻の漁船を借り上げて2班編成で2005年12月2日に、満潮前から干潮過ぎにかけて10時間観測を実施した。一隻は移動船として、東与賀町沖の定線St.1-8地点(○)に沿って、繰り返し断面観測を実施した(図1)。もう一隻は、地点4(●)に係留し、干出時には摺座させ、冠水時間中は、40分間隔で水質観測・採水を実施した(図2)。

地点4での係留観測では、多項目水質計AAQ1183（アレック電子社製）を用いて水温・塩分・電気伝導度・濁度を測定した。またそれ以外に、舷側に取り付けた ADCP（RD Instruments 製 Workhorse 1200kHz）によって5分毎に、表層75cm以浅は電磁流速計（KENEK VP2400）を用いて10分毎に流速プロファイルを測定した。観測で得られた係留点での流速は、地点1-8の測線の方向を14°とし、測線方向、直交方向に分けて解析した。栄養塩分析用試料は、40分毎に海底から20,125, 255cm層を、色素分析用試料は海底上5cmから1mまでは30cm間隔で、それより以浅では50cm間隔で採水した。光合成色素の分析試料は、採水後、クーラーボックスへ入れ、実験室へ持ち帰り直ちにGF/Fフィルターにてろ過し、分析するまで-20°Cで冷凍保存した。

移動船による観測は、上げ潮から下げ潮、再び上げ潮時にかけて地点1-8間の往復観測1~4を実施した(図2)。往復観測では、各調査地点で停止し、Compact CTD（アレック電子社製）による水温・塩分・電気伝導度・濁度を測定した。但し、観測1での地点7の濁度は異常値だったため、解析には用いなかった。また栄養塩分析用の試料は、観測時の表層・中層・底層で採水し、色素分析用の試料は観測1・2において海底5cmから水深1mまでは30cm間隔で、それより以浅は50cm間隔で採水した。本論文では、色素分析試料を採取した観測1と2の結果を報告する。なお多項目水質計によって得られた濁度からSSへの換算は、現場の海底20cmの海水を実験室へ持ち帰り、

測定したSS (mg/L) と濁度との関係式 ($SS=2.53 \times \text{濁度} + 0.42, r^2=0.98$) によって求めた。

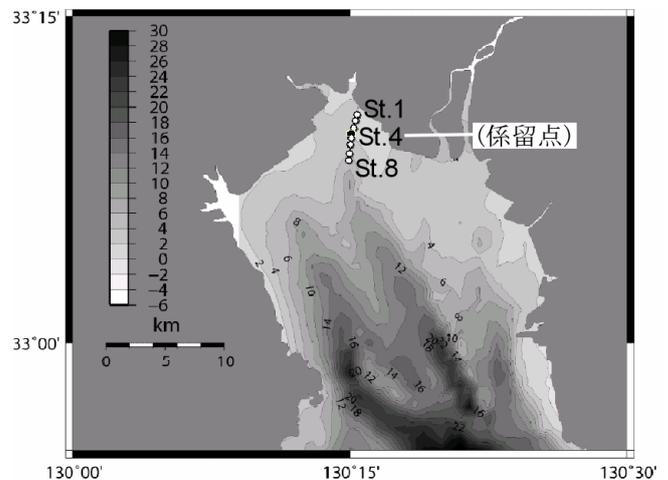


図1 調査地点 (St.1-8) 位置図

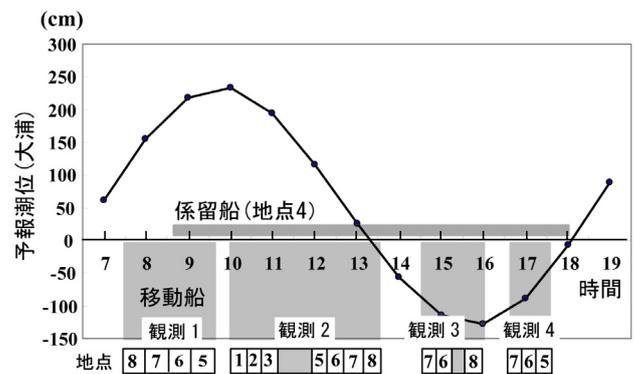


図2 予報潮位 (大浦) と観測順序

(2) 色素分析

本研究では、総計165の光合成分析用試料を採水し、GF/Fフィルターにろ過した。分析は調査後3ヶ月以内に、ダイオードアレイ検出(Shimadzu SPD-M10AVP)による、逆相高速液体クロマトグラフィ(Shimadzu LC-10AD)を用いて実施した⁸⁾。分析試料の前処理は、GF/Fフィルターをアセトンによって30分間超音波抽出(0°C)を行い、波長300nm~700nmにおける光合成色素の吸光スペクトルを測定し、標準物質あるいは文献値⁹⁾との比較により同定・定量を行った。なお、観測時の植物プランクトンは主として珪藻・渦鞭毛藻類の2分類群から構成されることが検鏡から明らかになっており、本論文では、カロチノイド色素 Peridinin を渦鞭毛藻類の指標として、Fucoxanthin を珪藻の指標として用いた⁹⁾。

(3) 係留点の塩分勾配・底面せん断応力・再懸濁フラックスの推定

塩分勾配(dS/dx)は、海底上20cmにおける塩分 S の時間変化と側線方向の流速 u (cm/s)から、次式によって見積もった。

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\frac{dS}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \frac{1}{u} \cdot \frac{dS}{dt}$$

但し、 x は側線方向の距離、 t は時間である。

底面せん断応力は、ADCPで得られた鉛直流速分布から対数則に近似し計算して求めた。なお、詳細は同報告集の山本浩一氏の報告に記載されている。

再懸濁Fucoxanthinフラックス E ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)は、水柱現存量変化 T ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)、沈降速度 W_s から推定される沈降フラックス S ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)、水柱の高さ H (m)の増加速度 $\Delta H/\Delta t$ (m/s)による沈降フラックス補正 M ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)から、次式によって見積もった。なお、沈降速度 W_s は山本(2007)¹⁰)に従い $W_s = -7.63 \times 10^{-4}$ (m/s)として沈降フラックスを見積もった。

$$E = T - S - M$$

但し、 E は再懸濁フラックス($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)、 T は水柱現存量変化($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)、 S は沈降フラックス($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)、 M は水柱変化に伴う沈降フラックス補正($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)である。

3. 結果

(1) 係留点における水質・流速鉛直分布の変動

図3に係留点での塩分・水温・Sigma-t・SS・Sigma-t+SSの時系列変化を、図4に流速を示す。係留点での塩分は観測中、27.4-29.8の範囲内で変化し、満潮時の底層で29.8程度の高塩分層が見られ弱い塩分層が見られる以外は、ほぼ一様で成層は発達していない。また下げ潮時にかけての塩分低下は、岸よりの低塩分水塊が移流していることを示している。Sigma-tおよびSigma-t+SSは、塩分濃度の変化とほぼ同じ変動を示す。水温は13.4-15.1°Cの範囲で下げ潮時にかけて急速に低下、時間的な変動は大きい、表層と底層での差異は見られず、ほぼ鉛直一様である。懸濁物質SS濃度は流速が低下する満潮時にかけて全層を通じて低濃度となるが、流速が大きく増加する下げ潮時にかけて急激に増加し、干出前後に最大となる。

係留点での測線方向の流速は、観測を開始した8時29分には、北(岸)向に20cm/sであった。満潮を迎えた10時には、側線方向の流速はほぼ0となり、その後、下げ潮時は逆の南(沖)向の流れとなった。11時24分には、最大で30cm/sを超える流れが生じた。

その後、再び、流れは弱まり、15時には干潟が干出した。さらに16時40分には、再び冠水し、上げ潮に伴って流速が増加、17時40分には流速40cm/sに達した。直交方向については、観測開始から干出するまで常に東向きの流れとなっていた。一方、再冠水後の上げ潮時になると、流れは西向きに転じた。流速はいずれもほとんどの場合、10cm/s以下で、側線方向に比べると流れは弱かった。以上の結果は、側線方向の流れはほぼ半日周期による流れによって支配されているのに対し、直交方向はそれ以外の流れが卓越していたことを示している。

(2) 係留点での色素濃度の鉛直分布の変動

藻類全般の生細胞を指標するChlorophyll-aは、上げ潮時から満潮時にかけて、表層に濃度が集中する分布を示す(図5)。下げ潮時には、全層を通じて急速に増加し干出前に最大となる。Chlorophyll-aの分解産物で植物プランクトンが死亡、捕食され形成される、Pheophtin-aは、Chlorophyll-aとほぼ同様な分布を示す(図5)。

分類群レベルでは、珪藻を指標するFucoxanthinの濃度は、満潮時には全層でほぼ一様に低い値を示し、下げ潮時にかけて全層で濃度が高くなり、干出直前の底層で最大値を示した(図5)。一方、渦鞭毛藻類を指標するPeridinin濃度は、上げ潮～満潮時にかけて表層に集積する分布を示し、満潮時の表層で最大となる(図5)。一方、下げ潮時になると、表層の高濃度層が見られなくなり、全層を通じ急速に低下した。下げ潮時は沖向きの流れが卓越することから、下げ潮時の急速なPeridinin濃度の低下は、表層の高濃度層が沖側へ移動したことを示唆している。

(4) 水質項目の断面分布

移動船による観測1は、上げ潮時の7時32分から満潮直前の9時10分にかけて行い、地点8から5までの各点で観測を行った(図2)。図6は観測1の観測結果に、係留点である地点4の満潮時の10時9分の観測結果を追加して作成した塩分・水温・Sigma-t・SS・Sigma-t+SSの断面分布である。塩分・Sigma-tは観測中それぞれ30、22程度で、地点4-6付近に弱い塩分層が見られる以外、ほぼ鉛直一様である。水温は15.1°C程度でほぼ一様、地点間の差異は見られない。SSは30-240mg/Lの範囲内で大きく変化し、上げ潮時に観測した地点6-8で高く、満潮前後に観測した地点4-5で急激に減少する。SSを考慮に入れたSigma-t+SSの分布は満潮時の地点4で表層と底層で差異があり、塩分同様、弱い成層構造が認められた。

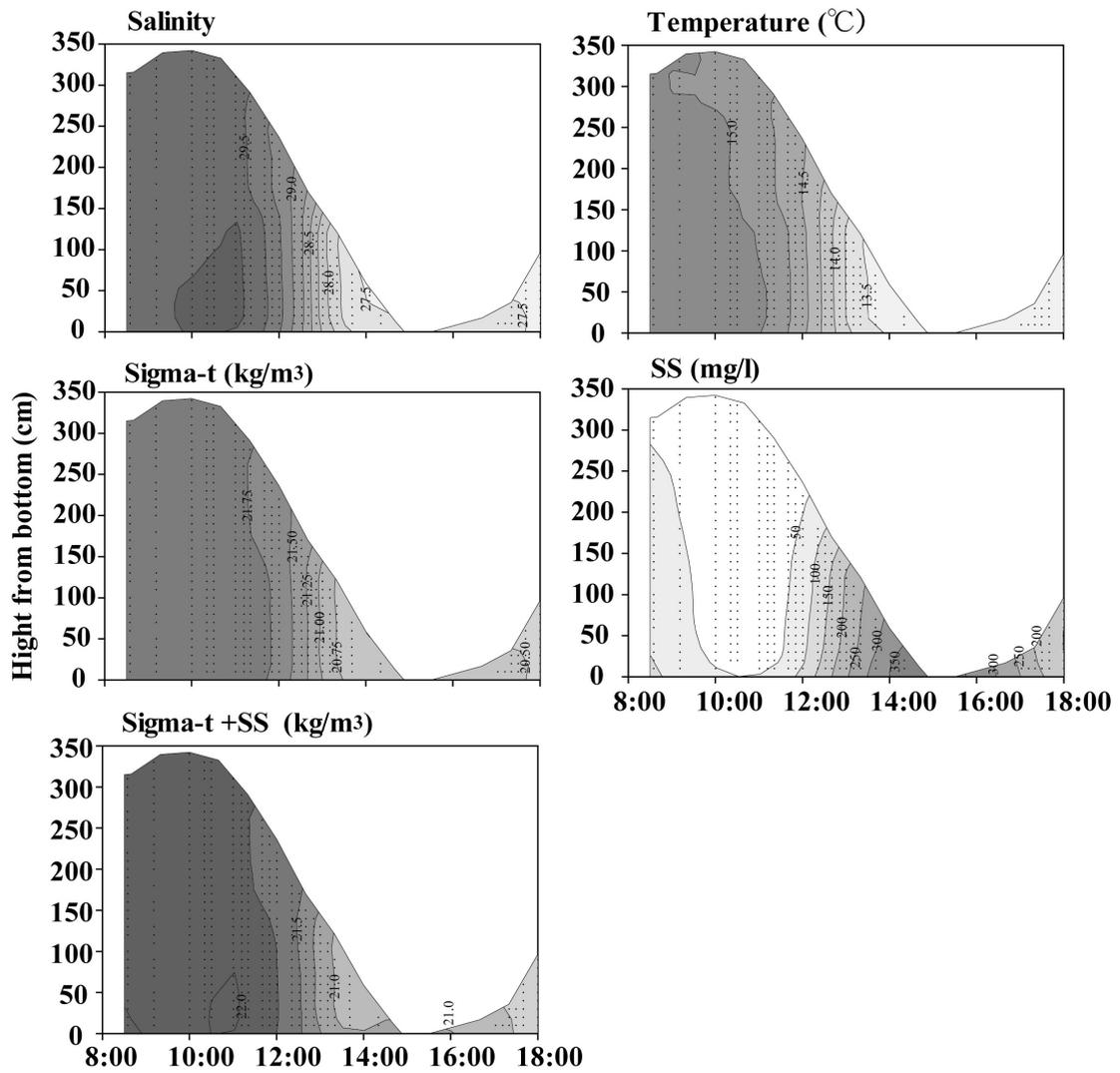


図3 係留点, 地点4における塩分・水温・Sigma-t・SS・Sigma-t+SSの時系列コンター

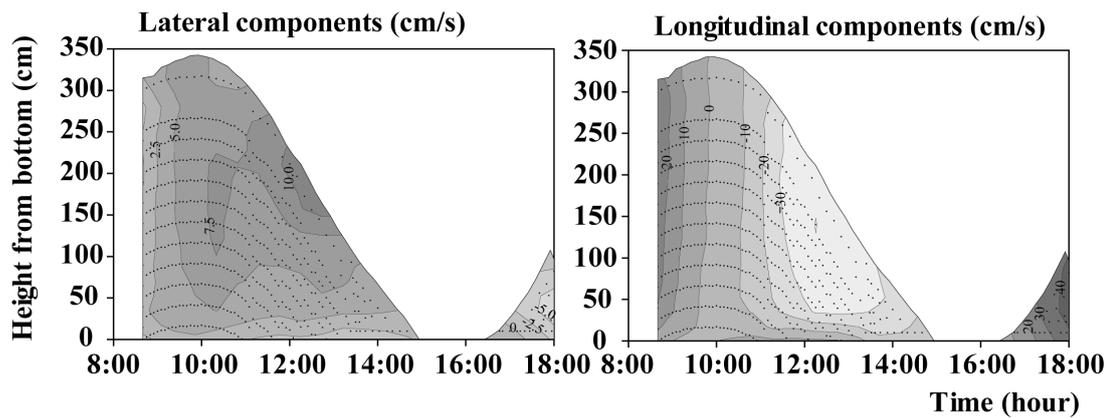


図4 係留点, 地点4の直交・測線(14度)方向の流速の時系列コンター

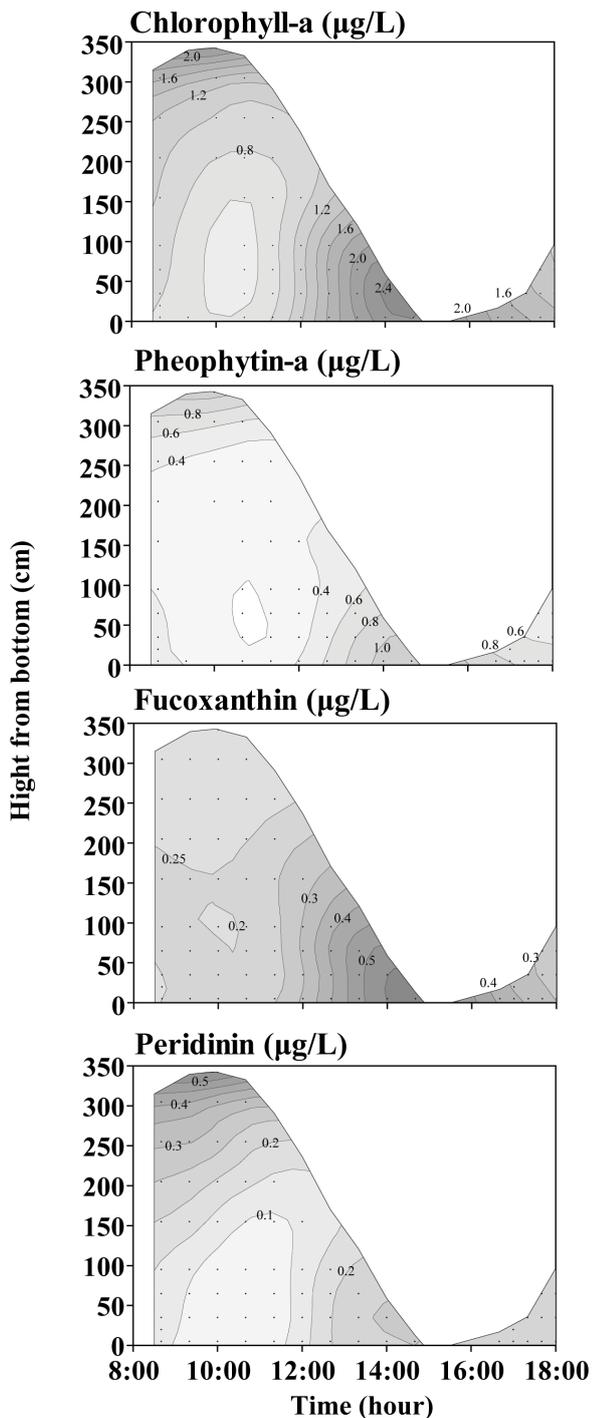


図5 係留点，地点4の色素濃度の時系列コンター

満潮時から下げ潮時にかけての観測2は，9時57分に岸よりの地点1にて開始し，沖側の地点8で13時27分に観測を実施した．観測結果を図7に示す．塩分は全体として，岸側で低く，沖側で高い．地点1から3にかけて成層が強まり，底層塩分は増加しているが，より沖側では成層が弱まり，底層塩分も低下していた．これは満潮(岸側)から下げ潮(沖側)にかけて観測したため，水柱が鉛直混合されたことの影響が表れていると考えられる．水温分布はほぼ塩分分布に対応しており，低塩分ほど低温になっている．SSは

観測中，全般に底層で高く，表層にいくにつれ減少する．特に，高い値を示すのは，岸よりの地点1と下げ潮時で流速が大きかったと予想される沖側の地点8の底層であった．地点8の底層でのSS増加は，下げ潮時に底泥の巻上げが盛んに生じていることを示唆している．一方，地点1は，流れが止まる満潮時にも関わらず，底層に高濁度層が存在する．これは，地点1の塩分が29-28.8で，(7)で後述する塩分フロントの水塊に対応していることから，上げ潮時に塩分フロント付近の活発な巻上げによって生じた懸濁物質が，満潮時に沈降していく過程を捉えたものと考えられた．

(5) 色素の断面分布

上げ潮時から満潮前の観測1におけるChlorophyll-aは，流速の大きな上げ潮時に観測した地点8の底層で顕著に高い(図8)．逆に，満潮前後に観測した地点4・5では表層で高い．Pheophytin-aの分布はChlorophyll-aと類似している(図8)．カロチノイド色素，渦鞭毛藻類を指標するPeridinin濃度は，全体に表層で高く底層で低いのに対し，逆に珪藻を指標するFucoxanthinの濃度は，底層で高く，表層1m以浅で顕著に低くなる(図8)．

満潮から下げ潮時にわたる観測2ではChlorophyll-aの分布は，ほぼ一様で中央の地点3-6でやや低い傾向がある(図9)．一方，Pheophytin-aはChlorophyll-aと同様中央の地点3-6で低いが，表層と底層で濃度差があり，下げ潮時に観測した沖側の地点7-8では底層で高く，満潮時に観測した岸よりの地点1では表層で高い(図9)．一方，珪藻を指標するFucoxanthinは底層で高く，表層にいくにつれ減少する(図9)．特に，満潮時に観測した岸よりの地点1と，下げ潮時で大きな流速が予想される沖側の地点8の底層で高い値を示し(図9)，SSの分布と類似している．逆に，渦鞭毛藻類の指標であるPeridinin濃度は，岸よりの地点1-3の表層で高く，地点2の表層で最大値を示す．しかし，下げ潮時に観測した沖側の地点5-8では，表層と底層での濃度差は少なくなり，全層一様に分布する．

(6) SS濃度とFucoxanthin, Peridinin濃度の関係

図10は実測値が得られた底から20cmのSSとFucoxanthin, Peridininの底から5cm・水柱平均濃度との関係を示した散布図である(図10)．珪藻の指標であるFucoxanthinは，いずれもSS濃度と強い正の相関関係を示した(底から5cm・水柱平均濃度それぞれ $r^2 = 0.54 \cdot 86, n=13, P < 0.001 \cdot P = 0.0023$)．一方，渦鞭毛藻類の指標であるPeridininは水柱平均濃度との間には有意な相関関係は得られず，底から5cmの濃度と弱い相関関係を示した($r^2 = 0.31, n=13, P = 0.046$)．

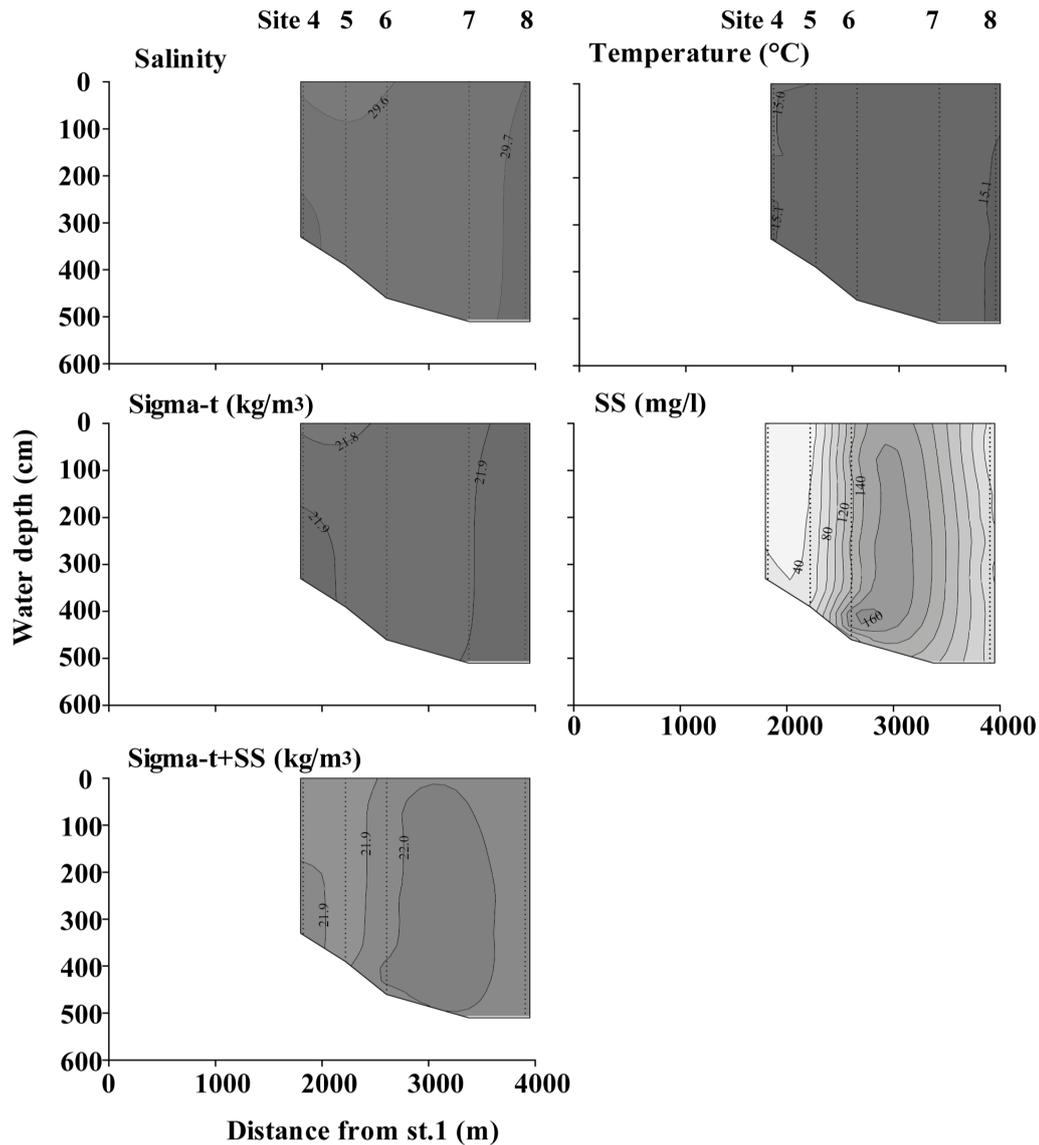


図6 観測1回目(地点4-8)の塩分・水温・Sigma-t・SS・Sigma-t+SSの断面分布

(7) 係留点における塩分勾配・底面せん断応力・SS・色素の変動

塩分勾配が係留点で最も大きくなったのは、12時50分で、これは底面せん断応力が最も大きくなる時刻とほぼ一致した(図11)。これは塩分フロントが通過する時に最も海底面のせん断応力が大きくなり、巻き上げが活発になることを示す。また塩分勾配が最大になる時の塩分値は、28.4であり、図4の塩分と図11の塩分勾配の時系列変化から、塩分28~29の間に塩分フロントが存在していたことがわかる。

SSは下げ潮時、底面せん断応力が0.2 (Pa) を超える12時頃より急速に増加する(図11)。12時50分以降、底面せん断応力は急速に低下するが、SSはさらに干出時まで増加する。これは、山本(2007)¹⁰⁾ が指摘しているように、塩分フロントが通過した12時50分の時刻を境に、水平移流分とみられる、干潟部に存在

する高濁度水塊が係留観測点を通り、SS負荷が増加したためと考えられる。

珪藻を指標するFucoxanthinは海底5cm・水柱平均濃度および推定再懸濁フラックスは、ほぼ同じ変動を示した。また、これらは底から20cmのSSとほぼ同じ変動であった(図11)。これらの結果は、底面せん断応力が一定値を超えると、底泥・再懸濁珪藻フラックスが増加し、この巻き上がった珪藻の変動が水柱全体の平均珪藻濃度を支配していることを示している。

一方、渦鞭毛藻類を指標するPeridinin は海底5cmと水柱平均濃度で変動のパターンは異なった。これは、渦鞭毛藻類は底からの巻き上げが水柱平均濃度に強く影響を及ぼさないことを示唆している。Peridininの水柱平均濃度は、SSが低い満潮前に相対的にやや高い値を示し、その前後は低い値が維持されている。しかし、Peridininの水柱平均濃度は、先に述べたSS負

荷から示唆される水平移流分の干潟部に存在する高濁度水塊が係留観測点を通り過ぎたと思われる12時50

分以降、急速に増加する。

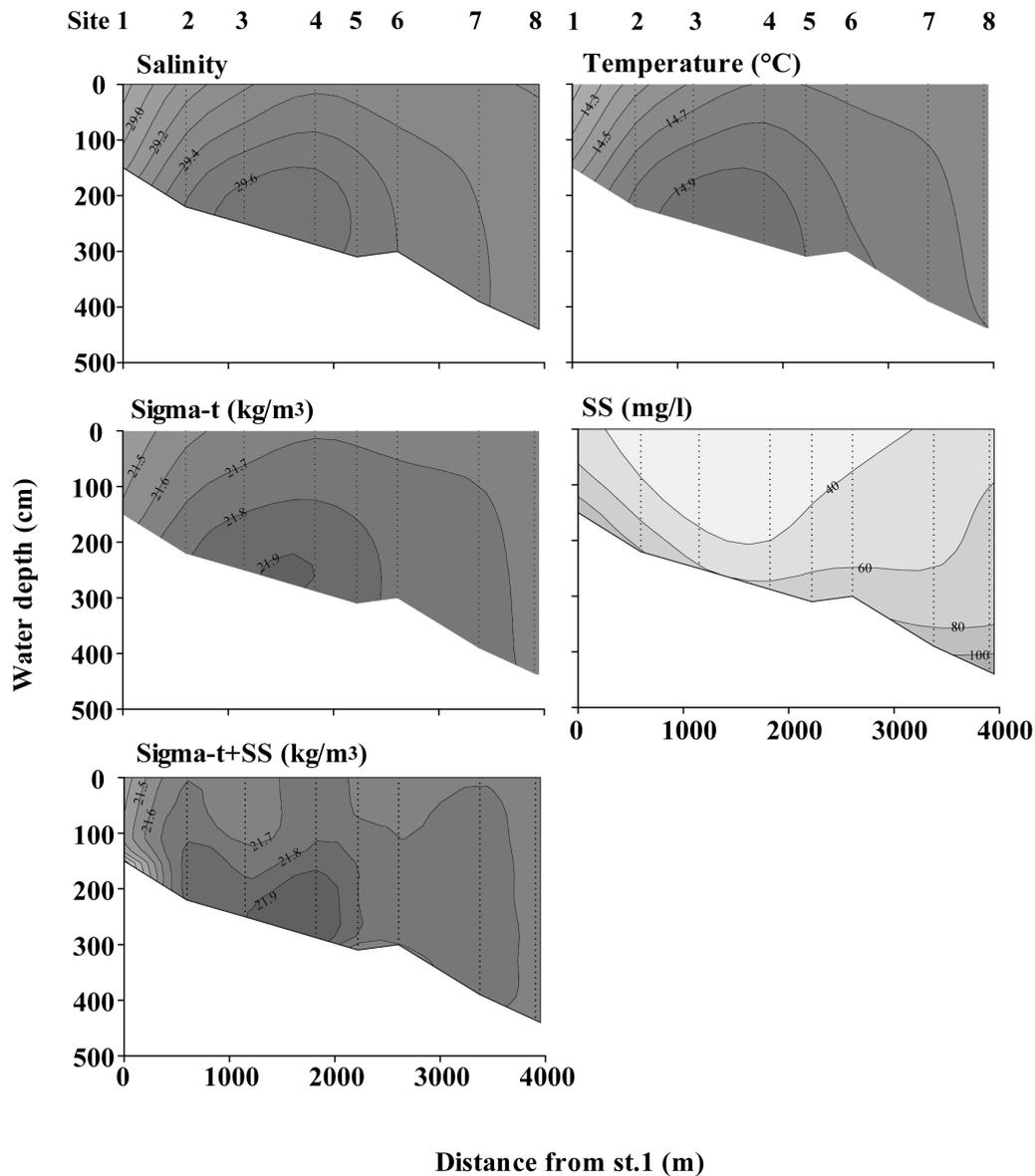


図7 観測2回目(地点1-8)の塩分・水温・Sigma-t・SS濃度・Sigma-t+SS濃度の分布

4. 考察

本研究は、一潮汐を通じた40分間隔の係留観測と断面観測を組み合わせ、冬季の有明海湾奥部において、赤潮を形成する珪藻と渦鞭毛藻類が、潮流に対して対照的な時空間分布変動を示すことを明らかにした。鞭毛藻類の分布変動には、潮流による水平的な移動が、卓越するのに対し、珪藻は渦鞭毛藻類と比べ、鉛直的な巻き上げの影響を強く受けていることが判明した。

渦鞭毛藻類の断面分布は、上げ潮時(観測1)には、沖側の地点6の表層に高密度層が見られた。次の満潮時(観測2)では、高密度層が岸側の地点2の表層で

確認された(図8・9)。高密度層が確認された地点6と2の塩分が29前後でほぼ同じであること、上げ潮時に観測した地点6から満潮時に観測した地点2の観測時間帯、すなわち8時40分から10時50分の時間は、岸向きの輸送が卓越していることから(図4)、この高密度層は潮流によって、地点6から地点2付近に移動したと考えられる。実際、係留点では、満潮時に認められた表層での渦鞭毛藻類(Peridinin)の高密度層が下げ潮時には認められなくなった。この結果は、高密度層が潮流の変化に伴い沖合に移動したことを示唆しており、断面観測の結果に基づいた推測と符合する。但し、渦鞭毛藻類の鉛直分布の変化は水塊の移動では説明がつかない。

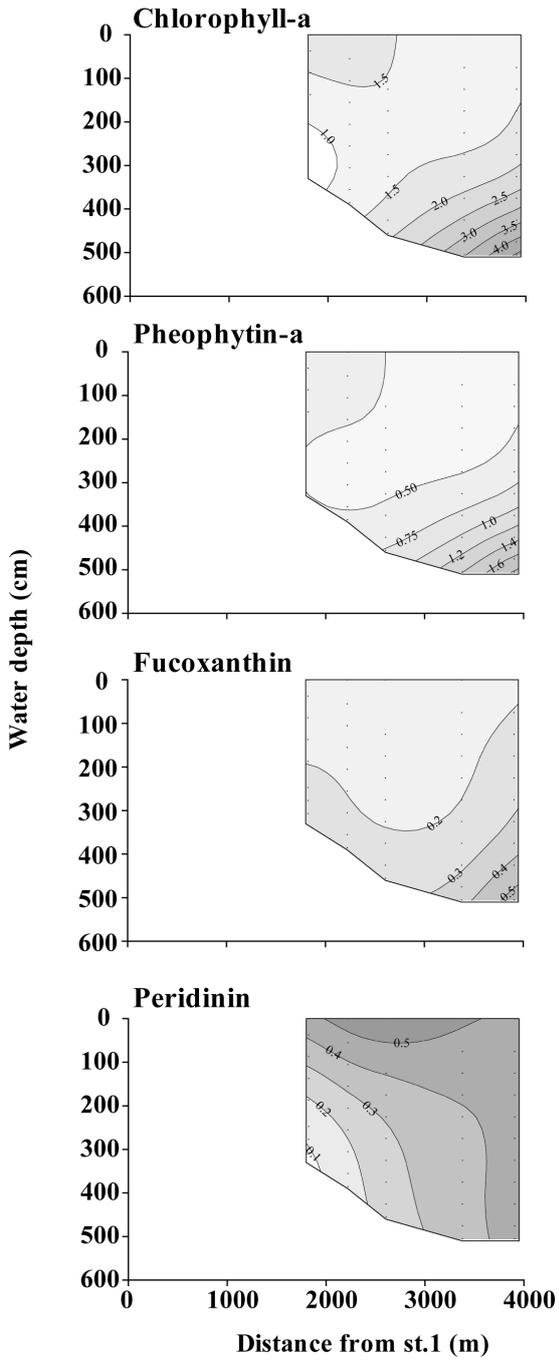


図8 観測1回目 (地点4-8) の色素濃度の断面分布

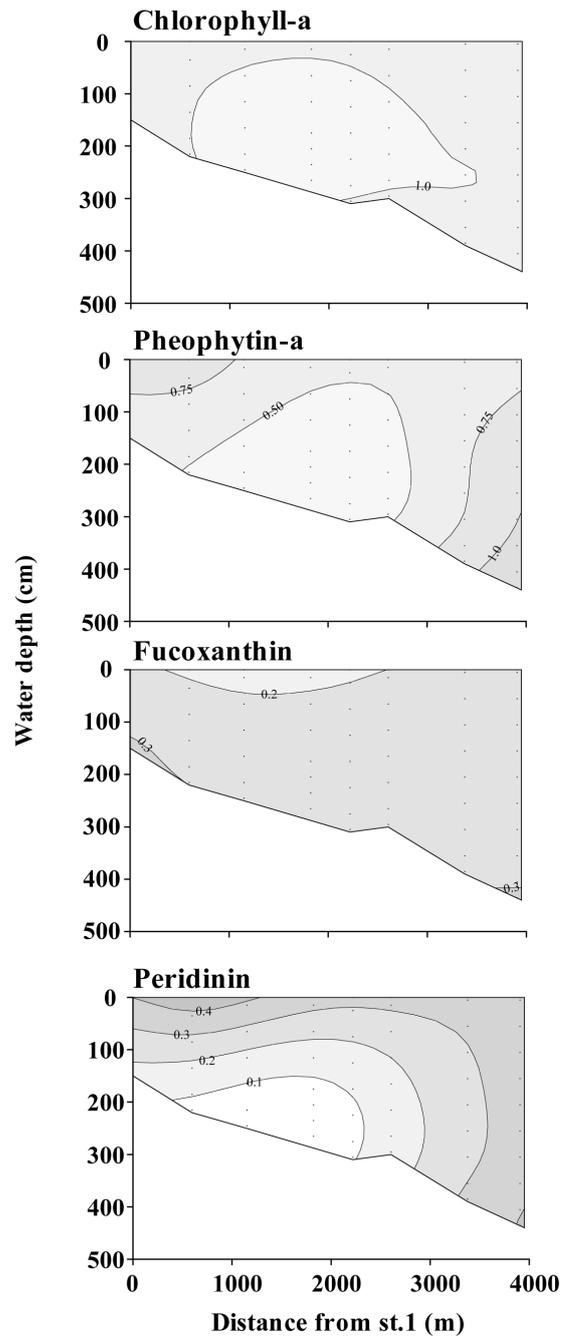


図9 観測2回目(地点1-8)の色素濃度の断面分布

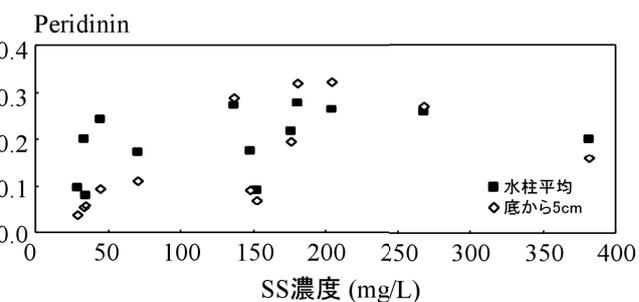
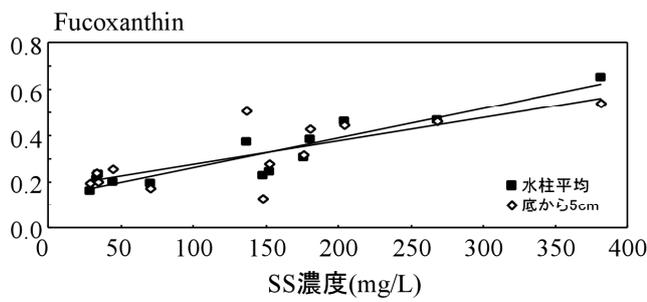


図10 係留点における底から20cmのSSとFucoxanthin, Peridininの海底5cm・水柱平均濃度

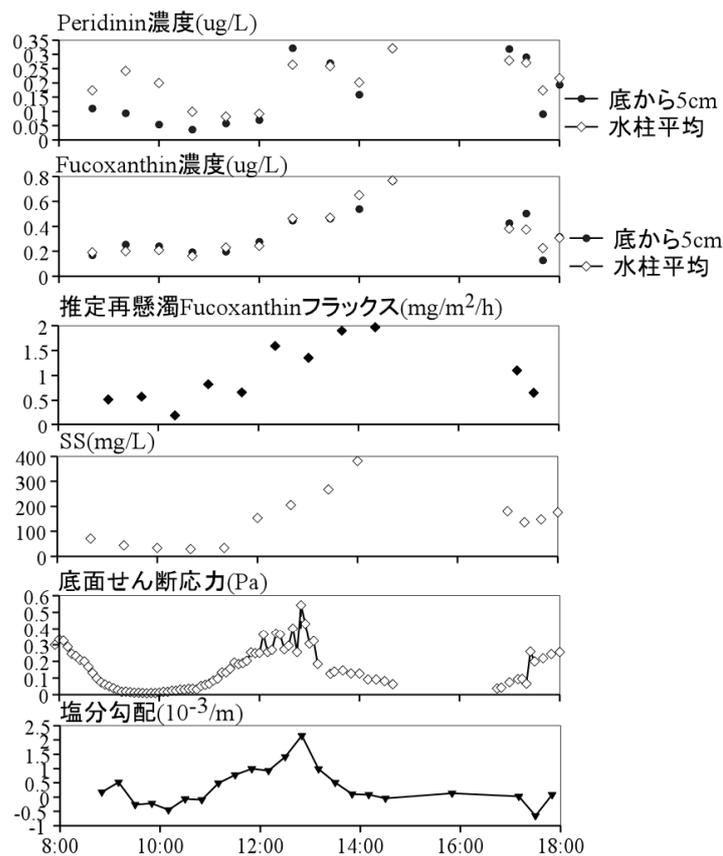


図11 係留点における塩分勾配・底面せん断応力・底から20cmのSS・推定再懸濁Fucoxanthinフラックス・Fucoxanthin, Peridininの海底5cm, 水柱平均濃度の時系列変化

Peridinin濃度の係留点における時系列コンターでは、渦鞭毛藻類は満潮時直前の午前8:40から10:00にかけて徐々に表層に集中分布するように変化した(図5)。この満潮時の表層への集中分布は、鞭毛藻類の能動的な鉛直移動に起因すると考えられる。つまり、鞭毛藻類は水塊の移動と共に水平移動するが、同時に能動的に鉛直移動を行い、分布が表層へ集積する。

一方、珪藻(Fucoxanthin)は、満潮時の係留点では、全層でほぼ一様に低密度だったが、水位の低下に伴い急速に増加した(図5)。この分布変動はSSと大変類似している(図3)。しかも水柱中の平均珪藻濃度は、実測値の得られた底から20cmのSSとの間に強い正の相関関係が得られた(図10)。係留点の底から20cmのSSの濃度変化は、潮流による底面せん断応力の増加(図11)と塩分フロント付近の盛んな巻き上げによって生じた高濁度水塊の通過¹⁰⁾に支配されている。従って、これらの結果は、主に潮流による底面せん断応力の増加に伴う底泥の巻き上げは、底泥表面の珪藻類を巻き上げ、結果的に、水柱中の平均珪藻濃度を上昇させていることを示している。一方、断面観測では、流れが止まる満潮時においても、岸よりの地点1で珪藻・SSの高密度層が底層に認められた(図7・9)。地点1は、塩分フロントに対応していることから(図3・11)、この高密度層は、上げ潮時に塩分フロント付近で活発に巻き上げられた珪藻・懸濁物

質が、満潮時に沈降していく過程であると考えられた。

有明海干潟域の珪藻類の巻き上げに関しては、山西ら(2003)¹¹⁾が鹿島沖での泥干潟で、干潟直上海水のChlorophyll-a濃度とSSが有意な生の相関関係を示すことから、底泥の付着藻類が盛んに巻き上がっている可能性を指摘している。しかし、山西ら(2003)¹¹⁾が用いたChlorophyll-aは、現場蛍光を測定するクロロフィル計による測定値であり、Chlorophyll-a以外に、死細胞を指標するPhaeophytin-aが含まれている。有明海の浮泥には、大量のPhaeophytin-a色素が含まれており¹²⁾、現場蛍光の測定値(Chlorophyll-a+Phaeophytin-a)そのままでは、藻類の現存量の指標にはならないことが指摘されている¹³⁾。本研究では、底から20cmのSSと珪藻(Fucoxanthin)の水柱平均濃度とに有意な相関関係があることを見出し(図10)、さらに、SS濃度変化と主に潮流によって生じる底面せん断応力の変化から、SSの濃度変化が主に、巻き上げによって生じていることを示した。すなわち、底泥の珪藻類の巻き上げが干潟直上水だけで無く、水柱全体の平均珪藻(Fucoxanthin)濃度を支配する主要因であることを示した。これらの結果は、有明海湾奥部干潟域における珪藻現存量の変動が潮流による巻き上げによって強く支配されていることを示すものである。

一方、渦鞭毛藻類(peridinin)はSSの変動とほとんど

関係がないことが判明した。この結果は、潮汐に対する藻類全体 (Chlorophyll-a) の現存量の変動は、底泥からの珪藻類の巻上げだけでは説明がつかないことを示している。山西ら (2003)¹¹⁾は干潟直上水のChlorophyll-a濃度が上げ潮時と比べ、下げ潮時で低いのは、巻き上がった付着藻類が二枚貝などに捕食され、減少したためではないかと推測している。本研究では、上げ潮時と下げ潮時で、渦鞭毛藻類の鉛直分布は異なっていた (図5)。従って、上げ潮時と下げ潮時の特定層だけの藻類現存量の変化には、このような渦鞭毛藻類の鉛直移動による濃度変化が影響を及ぼしている可能性が高い。これらの結果は、潮流が植物プランクトンにどのような影響を及ぼすのかを検証するためには、分類群レベルでの定量的な評価が必要であることを示唆している。

一方、底生微細珪藻類の干潟生態系における機能については、これまで白川河口干潟域での底生動物を用いた、炭素・窒素安定同位体比の研究¹⁴⁾では、二枚貝 (アサリ・シオフキ)の栄養源は、底生微細藻類よりも浮遊性プランクトンの寄与が大きいと報告されている。しかし、本研究では、懸濁物質と珪藻濃度が強い相関関係にあること、巻き上がった珪藻には底生種も豊富に含まれていることが判明しつつあり、本調査対象の干潟域では、懸濁物濾過食者の餌資源として、底生珪藻類の寄与が大きいことが予想される。今後は、干潟の底生珪藻類が湾奥部の干潟一浅海域の生態系において、どのような機能を果たしているのか、解析を進め、明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) Cloern, J.E., Powell, T.M., Huzzey, L.M.: Spatial and temporal variability in south San Francisco Bay (USA). II. Temporal changes in salinity, suspended sediments, and phytoplankton biomass and productivity over tidal time scales, *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 28, pp.599-613, 1989.
- 2) 武岡英隆: 有明海におけるM2潮汐の変化に関する議論へのコメント, *沿岸海洋研究*, 第 41巻, pp.61-64, 2003.
- 3) 藤原考道・経塚雄策・濱田孝治: 有明海における潮汐・潮流減少の原因について, *海の研究*, 13, pp403-411, 2004.
- 4) 速水祐一, 槻木玲美, 首藤俊雄: 有明海奥部における赤潮の経年変動, (投稿中)
- 5) 川村嘉応: 有明海湾奥部におけるここ数年の栄養塩不足とノリ生産体制, *海苔と海藻*, 67, pp.1-5, 2004.
- 6) Lauria, M.L., Purdie, D.A., Sharples, J.: Contrasting phytoplankton distributions controlled by tidal turbulence in an estuary, *Journal of Marine Systems*, 21, pp.189-197, 1999.
- 7) Lucas C.H.: Observations of resuspended diatoms in the turbid tidal edge, *Journal of Sea Research*, 50, pp. 301-308, 2003.
- 8) Tani, Y., Kurihara, K., Nara, F., Itoh, N., Soma, M., Soma, Y., Tanaka, A., Yoneda, M., Hirota, M. and Shibata, Y.: Temporal changes in the phytoplankton community of the southern basin of Lake Baikal over the last 24,000 years recorded by photosynthetic pigments in a sediment core, *Organic Geochemistry*, 33, pp. 1621-1634, 2002.
- 9) Wright, S. W. and Jeffery, S. W.: High-resolution HPLC system for chlorophylls and carotenoids of marine phytoplankton, *Phytoplankton Pigments in Oceanography*, Mantoura, R. F. C., Wright, Scott W., S. W. Jeffrey eds., UNESCO Publishing, Paris, pp. 327-350, 1997.
- 10) 山本浩一: 有明海大授干潟における底泥の再懸濁および沈降に関する現地観測, *海洋開発*, 講演要旨, 2007
- 11) 山西博幸, 荒木宏之, 高哲煥, 清川徹, 茂木裕介, 古賀憲一: 有明海湾奥部干潟域における懸濁物輸送と底泥付着藻類の変動特性に関する研究, *環境工学研究論文集*, 40, pp. 587-594, 2003.
- 12) 田中勝久, 浜田七郎, 代田昭彦: 有明海における懸濁物質の研究 - II. 筑後川河口域における植物プランクトンとデトライタスの分布と挙動, *西水研報*, 57, pp. 19-30, 1982.
- 13) 田中勝久, 児玉真史, 熊谷香, 藤本尚伸: 有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動, *海の研究*, 13 (2), pp. 163-172, 2004.
- 14) Yokoyama, H., A. Tamaki, K. Koyama, Y. Ishihi, K. Shimoda and K. Harada: Isotopic evidence for phytoplankton as a major food source for macrobenthos on an intertidal sandflat in Ariake Sound, Japan, *Marine Ecology Progress Series*, 304, pp. 101-116, 2005.

(2007. 3. 19受付)

筑後川感潮域における水理特性と物質輸送

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE ESTUARY OF CHIKUGO RIVER

平川隆一¹・速水祐一²・山本浩一³・横山勝英⁴

大串浩一郎⁵・濱田孝治³

Ryuichi HIRAKAWA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Katsuhide YOKOYAMA,
Koichiro OHGUSHI, Takaharu HAMADA

¹博(工) 佐賀大学助手 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²博(農) 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴博(工) 首都大学東京准教授 都市環境学部都市環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁵博(工) 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

The loading measure of the material that flows into the sea from the river requests from the flow rate and the material density measured from the estuarine basin in the upstream or is often estimated by the basic unit law. However, there are possibilities that the outflow is greatly different in the estuarine basin upper pole of kidney and the mouth of a river if the chemistry and the living thing change are received in the tide river channel. The effect of the filtration of seawater in the tide river channel in Chikugo River was attempted in 18 fiscal year and the recognition was attempted quantitatively by the site investigation and the data analysis.

As a result, it was clear that the amount to Ariake Sea of the suspended solid that flowed out was about 250 times the suspended solid that flowed in from the land to the tide river channel after passing the Chikugo and Hayatsue both mouths of a river at this measurement period.

Key Words : Ariake Sea, Estuary, Suspended Sediment, Net Transport

1. はじめに

有明海湾奥部に流入する河川はいずれも長大な感潮域を持つ。こうした感潮河川では、有明海の大きな潮位差とあいまって、一潮汐間に海域から感潮河道に流入し、再び海に流出する水のボリューム(タイダルプリズム)が河川流量に比べて大きい。河川から海に流入する物質負荷量は、感潮域よりも上流で測定された流量と物質濃度から求めるか、あるいは原単位法で見積もられることが多い。しかし、感潮河道内で化学・生物変化を受けるとすると感潮域上端と河口では流出量が大きく異なる可能性がある。物質によっては、上げ潮によって感潮河道内に輸送され、感潮域で異化あるいは堆積する。このことにより、ネットで見ると河川から海に流出するのではなく、海から河川に輸送される場合もあり得る(これを感潮域による海水の濾過効果と呼ぶことにする)。感潮域が長大な有明海湾奥部の河川では、このような効果は

かなり大きい可能性がある。内湾の物質循環モデルを構築する場合、河川から海に供給される物質フラックスを境界条件の一つとして与える。それは河口で与えられる場合が多い。しかし、上記のことを鑑みると、感潮域が大きい河川の場合、それでは適切な境界条件を与えることになっていないかもしれない。その場合、新たに適切な境界条件の与え方を提案する必要がある。

本研究の最終的な目的は、数値生態系モデルの河口境界条件の与え方を検討することにある。18年度は、最初の試みとして、筑後川感潮河道における海水の濾過効果を現地調査とデータ解析によって、定量的に評価することを試みた。

2. 調査概要

筑後川感潮域における1潮汐間の物質収支を求めるために、平成18年8月28日から29日にかけて、26時間にわ

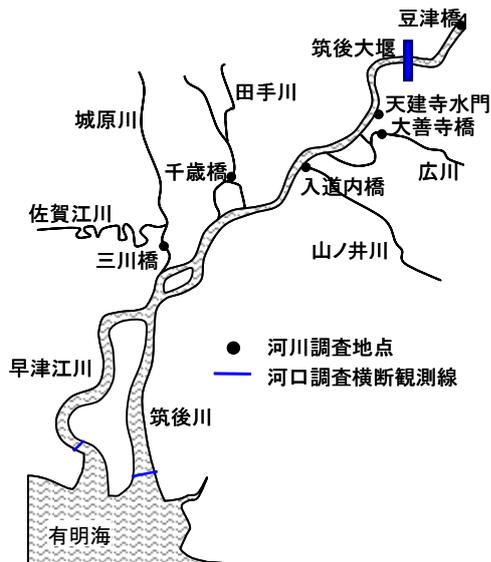


図-1 調査地点の概略。

たつて筑後川と早津江川の河口0k地点に於いて、流速と水質の横断反復観測を行った（河口調査、図-1）。同時に、感潮域上端および主要な支川の水質調査もおこなった（河川調査）。この期間は中潮であり、観測期間中は晴天で、風は弱く静穏であった。ただし、前日の天候は雨で、観測の10日前には台風第10号が九州に上陸したことによる降雨があった。流速測定は、往路の測線上を走行しながらおこない、船の舷側に取り付けたADCP（RD Instruments製、Workhorse 1200kHz）によって鉛直0.5m毎の流速を得た。水質測定は復路にて行い、多項目水質計（アレック電子製、AAQ1183）を用いて水温・塩分・濁度・クロロフィルa蛍光・DOの測定をおこなった。測定箇所は河道両岸と河道最深部、およびそれらの中間点の計5点である。ただし、水位が下がった場合には浅い測点では欠測となっている。また水質観測と同じ測点で、ペリポンプによる層別採水を行った。採水試料はクーラーに保冷して実験室に持ち帰り、Whatman GF/Fフィルターを用いて濾過した。フィルターは、あらかじめ100℃で恒量になるまで乾燥させた後、秤量したものをを用いた。濾過したフィルターは100℃で恒量になるまで乾燥させた後に秤量し、濾過前の重量との差と濾過量からSS濃度を求めた。河川調査では、STD（アレック電子製、Compact STD）および多項目水質計（YSIナノテック、600QS）によって水質を測定すると同時に、採水を行った。調査地点は筑後大堰（河口から約23km）よりも上流の豆津橋（同約25km）、大堰と河口の間に位置する天建寺水門（同約19km）、大善寺橋（同約18km、広川）、入道内橋（同約15km、山ノ井川）、千歳橋（同約12km、田手川）および三川橋（同約9km、城原川、佐賀江川）の6地点である（図-1）。支川については海水遡上の影響がない時間を選んで調査を行った。

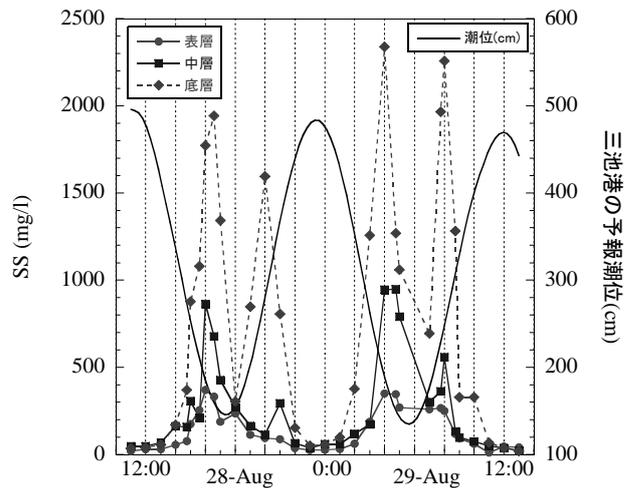


図-2 筑後川河口におけるSS濃度変化。

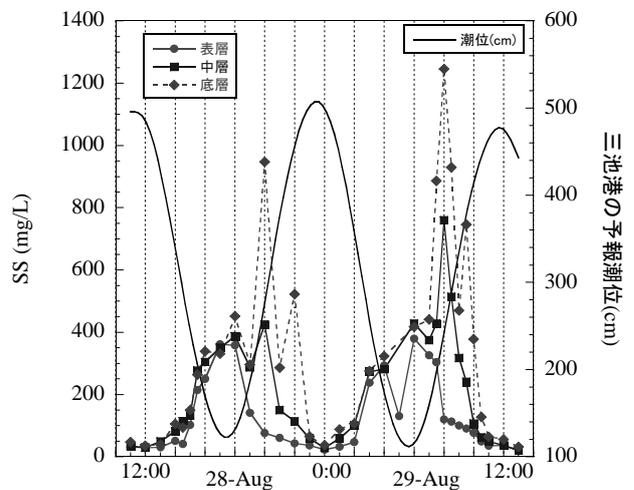


図-3 早津江川河口におけるSS濃度変化。

3. 結果

(1) 河口調査

図-2および3は、河口調査の層別採水で求められたSS濃度の時系列変化である。図-2の筑後川では、全体的に低層で濃度は高く、続いて中層、表層の順になっている。いずれの層も、濃度が上昇するのは干潮の約1時間前と上げ潮最強流時であり、満潮時には濃度は低い。また、上げ潮時よりも干潮前の方が、いずれの層に於いても濃度は高くなっている。図-3の早津江川に於いては、SS濃度は干潮の約3時間前から上昇する。その変化は筑後川と異なり、低層と中層は上げ潮最強流時のみ極大値を示している。表層では干潮時に高い濃度を示した。

河口調査で得られたSS濃度と、同時に測定された濁度から、濁度とSS濃度の関係を求めた。その結果を図-4、5に示す。濁度とSSの相関は早津江川河口に比べて筑後川河口の方が低くなっているが、濁度観測データを用いることにより浮遊成分の移動量が把握できると考えられ

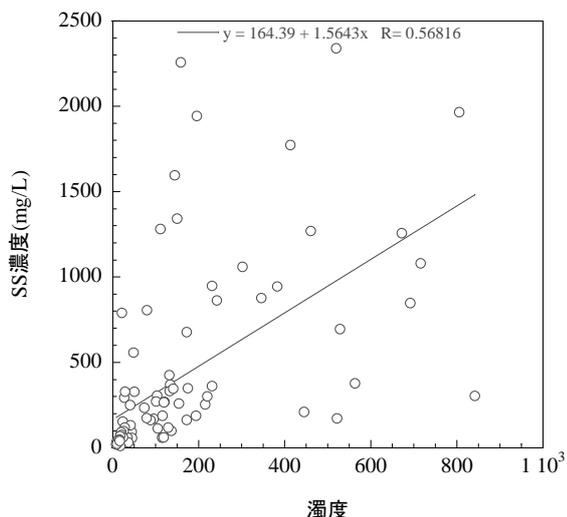


図-4 筑後川河口における濁度とSSの関係。

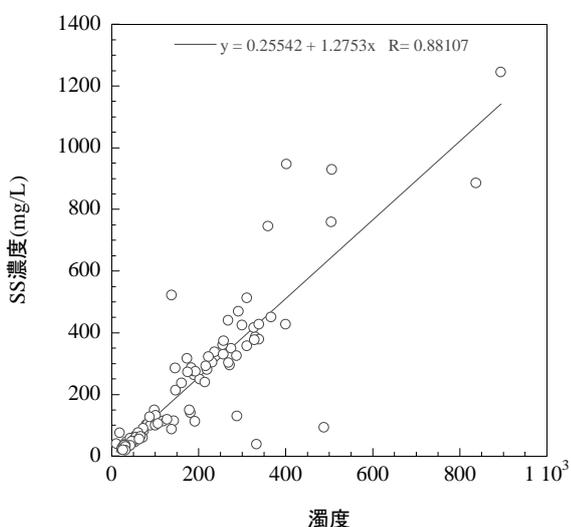


図-5 早津江川河口における濁度とSSの関係。

る。以降、河口調査の結果について、濁度からSS濃度に換算する際にはこの関係を用いた。

図-6には、筑後と早津江両河口における断面平均流速の26時間変動を示す。流下方向を正としている。両河口ともほぼ同位相であり、干潮と満潮時付近で流速はゼロとなっている。最大流速は筑後川の方が早津江川よりも10cm/s程度速いことが分かる。

図-7は、筑後と早津江両河口における26時間の換算SS濃度変動を示したものである。筑後川では下げ潮時と上げ潮時に極大値が現れるが、下げ潮最強流時に於いて濃度が高いことが分かる。また計測期間中に於いては、換算SS濃度は最低でも約200mg/lに達していた。早津江川では上げ潮時に濃度は最大値を示した。

図-8は、筑後と早津江の両河口における断面積についての26時間の変動を示したものである。水位と同位相で変動しており、その範囲は筑後川で約1,200~4,800m²、早津江川では約100~2,200m²であった。

図-6および図-9から求められた流量の変動を図-9に示

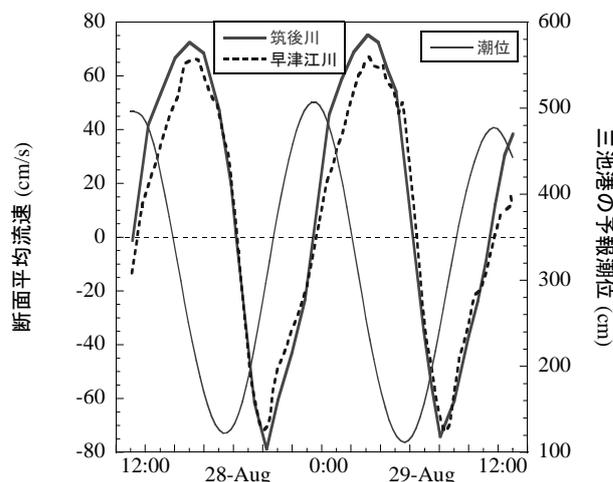


図-6 筑後、早津江河口における26時間の断面平均流速変動。

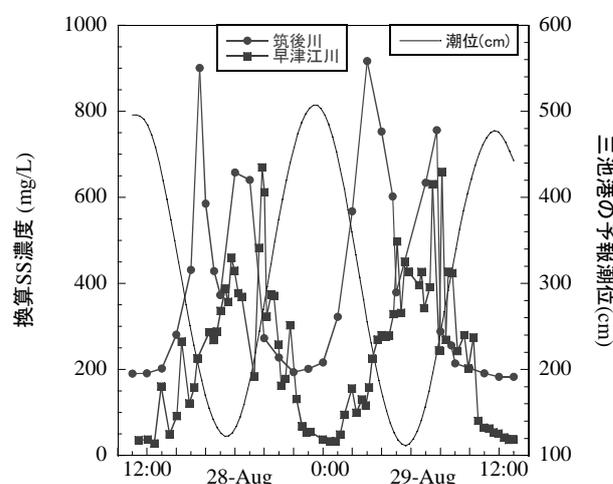


図-7 筑後、早津江河口における26時間の換算SS濃度変動。

す。断面平均流速と同様に、潮位に比べ約1/4波長ずれて変化している。変動の範囲は筑後川で±約2,200m³/s、早津江川では±約600 m³/sである。また、逆流から順流への変化はその逆よりも急であることが分かる。

図-10は河口断面におけるSS通過量を示したものである。観測期間に於いて、筑後川で感潮河道から有明海へと運び出される量の最大値は1,000kg/s程度であるのに対して、感潮河道へと有明海から運び込まれる量は最大で1,500kg/s程度である。早津江川での最大流出量は100kg/s程度であり、最大流入量は300kg/s程度であった。

(2) 河川調査

図-11に陸域から感潮域へと流入する支川のSS濃度と三池港における水位変化を示す。全体的に、豆津橋地点のSS濃度が小さくなっている。また、左岸の福岡県側から流入している支川(天建寺排水、広川、山ノ井川)のSS濃度は約5~30mg/lであるのに対して、それよりも下流に位置する、右岸側の佐賀県側から流入している支川

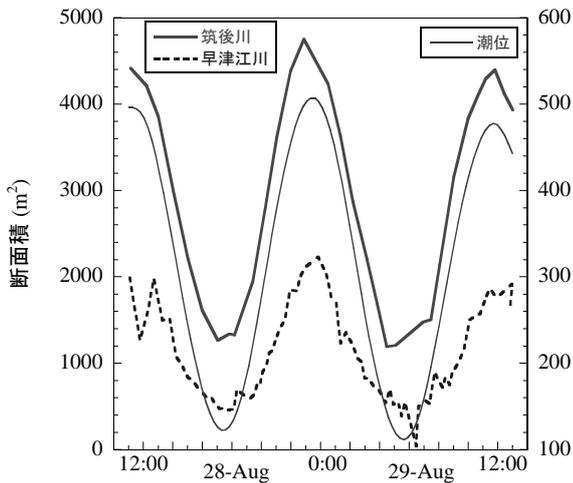


図-8 筑後，早津江河口における26時間の断面積の変動.

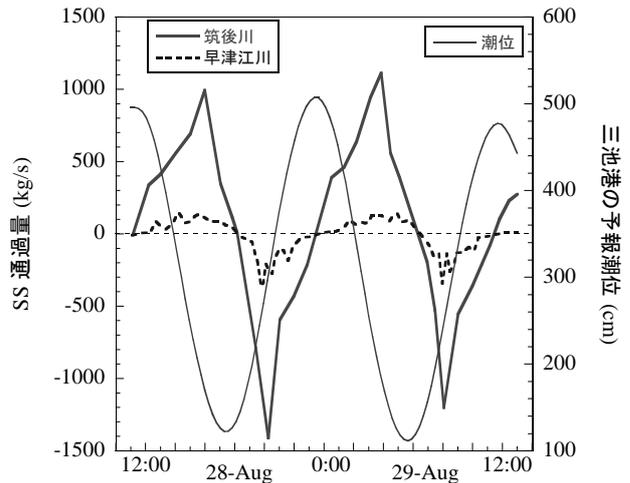


図-10 筑後，早津江河口断面を通したSS通過量の変動.

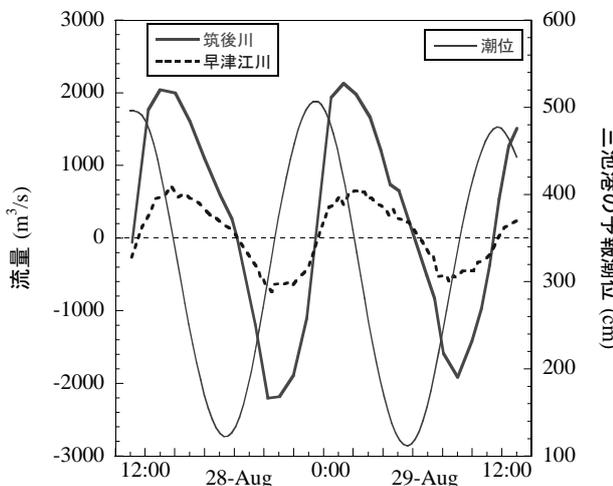


図-9 筑後，早津江河口における26時間の流量変動.

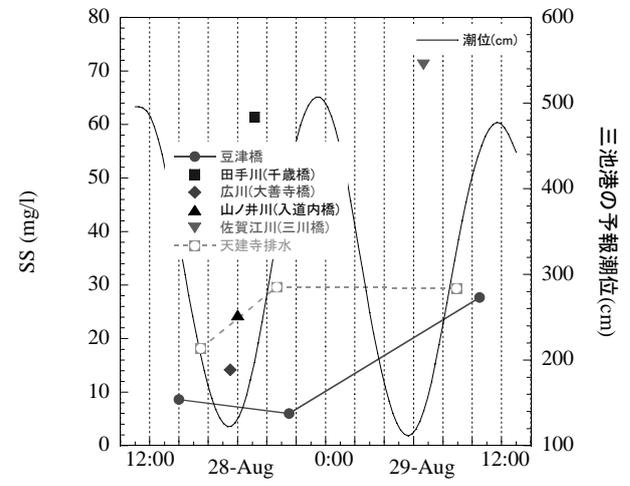


図-11 感潮河道に流入するSS濃度.

表-1 各調査地点のSS流入量

調査地点	SS流入量 (kg/day)
豆津橋	1,200
天建寺水門	2,220
大善寺橋	1,230
入道内橋	2,110
千歳橋	5,300
三川橋	6,150

(田手川，城原川・佐賀江川)のSS濃度は約60~70mg/lである。今回の計測箇所では，感潮域に流入するSS濃度は右岸のほうが左岸よりも高くなっていた。得られたSS濃度および流量データから，感潮河道内に流入する平均SSフラックスを算定した。支川ではSS濃度の断面分布が一樣であると仮定している。その結果，各地点におけるSS流入量は表-1のようになった。これらを合計すると，本調査時における筑後川感潮河道へのSS流入量は18,120kg/dayと見積もられた。

(3) 収支計算

図-10の1潮汐に着目すると，筑後，早津江河口合わせて約4,600t/dayのSSが河口断面を通して感潮河道から有明海へ流入していることが見積もられた。

4. 結論

本研究では，筑後川感潮河道の物質収支を求めるために現地観測を行った。その結果，今回の観測期間において，筑後と早津江両河口を通過して有明海への流出したSSの量は，陸域から感潮河道へと流入するSSの約250倍であることが明らかとなった。今回の見積もりは，流速・物質濃度を断面で平均して計算した結果であり，断面内の流れのシアによる輸送は考慮されていない。エスチャリーでは，流れの鉛直シアと物質濃度の鉛直分布の相互作用による物質輸送が重要である事が知られており，これについては，今後さらに検討を加える予定である。

(2007. 3. 19受付)

微生物相研究部門

Research Division of MICROBIAL TECHNOLOGY

有明海に生息する細菌の生産する II型制限酵素

STUDY ON TYPE II RESTRICTION ENDONUCLEASE OF BACTERIA ISOLATED FROM THE ARIAKE SEA

加藤富民雄¹・村田昌子²・神田康三¹・小林元太³
Fumio KATO, Akiko MURATA, Kohzo KANDA and Genta KOBAYASHI

¹農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農学部応用生物科学科4年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Type II restriction endonuclease activity in 242 strains of soil bacteria isolated from the Ariake sea at 20°C, 37°C and 55°C was investigated. The endonuclease activity was found out 54 strains among tested strains. Six kinds of restriction endonuclease activity were determined the recognition sequence by various DNAs digestion pattern. They are the isoshizomer of *Xho* I, *Bam*H I, *Bsa*A I, *Bst*E II, *Sau*96 I and *Eco*R II, respectively. The occurrence of active strain was almost same rate in isolated at 20°C, 37°C and 55°C. The identification of active strains by analysis of 16SrDNA sequence revealed that various kinds of bacteria are alive in Ariake sea, they could grow at 0°C to 60°C. The change of temperature of Ariake sea tideland seemed to be wide range though a year, so many kinds of microorganisms may affect each other and build up the optimum microbial flora.

Key Words : Ariake sea, Bacteria, TypeII restriction endonuclease, Temperature, Isolation

1. はじめに

II型制限酵素はDNA塩基配列中のパリンドローム構造を認識して切断する酵素¹⁾で、遺伝子工学における重要な試薬として数多く市販され、利用されている。この酵素は細胞に外来のDNA (例えばバクテリオファージ) が侵入するのを防ぐためのシステムであり²⁾、細胞自身のDNAは対応するメチラーゼでメチル化することで切断されるのを防御しており、これらは細菌の制限・修飾系と呼ばれている^{3), 4), 5)}。

有明海は半閉鎖系の内海で、独特の生物が生息していることや干満の差が大きいことなどの特徴を有している。この有明海から分離した細菌の生産するII型制限酵素を検索し、それらの特徴を明らかにすることで、有明海に生息する細菌相の変動がバクテリオファージの影響を受ける場合、細菌相の変動に制限酵素生産菌の存在がどのように関わっているかを解明できるのではないかと考えた。

有明海泥土から分離した細菌には様々な機能を持つものがあると考えられるが⁶⁾、一昨年その一種の細菌に

*Bam*H Iと同じII型制限酵素活性があることを明らかにした⁷⁾。今回は細菌を分離する温度を20°C、37°C及び55°C⁸⁾と変え、それぞれの温度で生育可能な細菌のII型制限酵素活性の検索を行った。II型制限酵素活性の強い株については16SrDNAの塩基配列解析により菌の同定を行った。それぞれの制限酵素の性状や認識塩基配列の検討を行った結果を報告する。

2. 材料と方法

(1) 細菌の分離

(a) 分離用サンプル

土壌サンプルは、東与賀町、有明水産センター近くの干潟泥土および六角川河口観測塔の海底泥土を用いた。

(b) 分離培地

分離培地は3種類用意し、グイヨン培地 (1%肉エキス, 1%ポリペプトン, 0.3%酵母エキス, 0.5% NaCl) および 1/2 グイヨン培地 (グイヨン培地組成の 1/2)。さらに海底土から細菌の分離にはDifco

Marine Broth 2216(ペプトン 5g、酵母エキス 1g、クエン酸鉄 0.1g、NaCl 19.45g、MgCl₂ 3.25g、CaCl₂ 1.8g、KCl 0.55g、Na₂CO₃ 0.16g、KBr 0.08g、SrCl₂ 34mg、ホウ酸 22mg、NaF 2.4mg、NaSi 4mg、硝酸アンモニウム 1.6mg、リン酸二ナトリウム 8mg、蒸留水 1 リットル)を用いた。固形培地には寒天 1.5%を加えた。

(2) 制限酵素活性のスクリーニング

(a) 使用菌株

上記で分離された238株を制限酵素活性のスクリーニングに用いた。

(b) 制限酵素活性スクリーニング法

分離培地と同様の液体培地に接種しそれぞれの菌の適温で、一晩振とう培養後集菌、超音波により菌体を破碎し、抽出液を得た。抽出液 5 μ l、0.2 μ g λ DNA 1 μ l、2 \times 666buffer(6mMTris-HCl、6mMMgCl₂、6mM2-mercaptoethanol) 10 μ l、H₂O 5 μ lからなる反応混合液をそれぞれの株の適温で 30min反応させ、アガロースゲル電気泳動により活性を確認した。

(3) 菌の同定

制限酵素の活性が強い株(28株)については分離培地で培養した菌体からDNAを抽出し、16S rDNAの塩基配列解析を行い、菌株の同定を行った。

(4) 酵素の部分精製

(a) 制限酵素活性が顕著だったAM-2-3株を200mlのブイオン液体培地で一晩振とう培養した。

(b) 菌体を遠心(1,500 \times g、4 $^{\circ}$ C、15分)により集菌後、超音波により菌体破碎を行い、超遠心(70,000 \times g、4 $^{\circ}$ C、60分)により上清を得た。

(c) 得られた抽出液をホスホセルロースカラムに供し、0.1M~1.0MNaCl リニアグラジェントにより溶出させた。フラクションは2.5ml ずつ、70画分回収した。活性画分はSephadex G-100カラムに供し、溶出した活性画分を粗酵素液とした。

(5) 制限酵素の認識配列決定

制限酵素活性の高い株についてはホスホセルロースカラムで部分精製を行い、数種の基質DNA(λ 、ColE1、 ϕ X174、pBR322、pUC19)を用いて、それらの切断パターンから認識塩基配列の決定を行った。

3. 結果

(1) 制限酵素活性のスクリーニング

分離した細菌の制限酵素活性を検討したところ表1-3に示すように分離した242株のうち54株にヌクレ

アーゼ活性が見られた。20 $^{\circ}$ Cでは105株中18株、37 $^{\circ}$ Cでは88株中22株、55 $^{\circ}$ Cでは49株中14株であった。55 $^{\circ}$ Cが制限酵素産生株の割合が高かったが、同種の菌が多く分離した細菌の種類が少ないためと考えられた。

表1 制限酵素活性のスクリーニング (20 $^{\circ}$ C)

菌名	土壌	分離培地	分離株数	制限酵素活性株数
A-		ブイオン	15	0
AH-	有明センター近	1/2ブイオン	15	4
AM-	くの干潟泥土	マリンアガー	25	7
R-		ブイオン	15	1
RH-	六角川観測塔	1/2ブイオン	15	3
RM-	の海底土	マリンアガー	20	3
計			105	18

表2 制限酵素活性のスクリーニング (37 $^{\circ}$ C)

菌名	土壌	分離培地	分離株数	制限酵素活性株数
H-	東与賀町	1/2ブイオン	4	1
A-		ブイオン	12	3
AH-	有明センター近	1/2ブイオン	13	2
AM-	くの干潟泥土	マリンアガー	15	8
R-	六角川観測塔	ブイオン	16	3
RH-	の海底土	1/2ブイオン	8	0
RM-		マリンアガー	20	5
計			88	22

表3 制限酵素活性のスクリーニング (55 $^{\circ}$ C)

菌名	土壌	分離培地	分離株数	制限酵素活性株数
A-	有明センター	ブイオン	13	3
AH-	近くの干潟泥	1/2ブイオン	4	2
AM-	土	マリンアガー	7	0
R-	六角川観測塔	ブイオン	11	6
RH-	の海底土	1/2ブイオン	7	2
RM-		マリンアガー	7	1
計			49	14

(2) 菌の同定

各温度で分離した制限酵素産生株の中で活性の高い株の同定を行った。 λ DNAの切断パターンが異なる菌株を選び、28株について菌体からDNAを抽出し、16SrDNAの塩基配列約500を解析して、菌の同定をBlast検索によって行った。

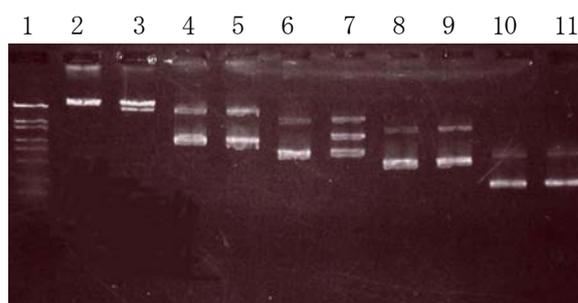
表4 菌の同定

菌名	相同性(%)
20°Cで分離	
20AH-1 <i>Exiguobacterium</i> sp. C11R2T5	99
20AH-11 <i>Bacillus macroides</i> SB12K-2-2	98
20AM-39 <i>Bacillus</i> sp. MHS010	100
20AM-40 <i>Vibrio harveyi</i> isolate VHJR14	100
20RM-16 <i>Bacillus cereus</i> site4w	99
37°Cで分離	
37A-10 <i>Bacillus subtilis</i> strain MG-1	99
37A-11 <i>Bacillus</i> sp. 19-B	99
37AH-12 <i>Bacillus</i> sp. H819	99
37AM-9 <i>Bacterium</i> JL-74	100
37R-13 <i>Bacillus smanii</i> strain C1	100
37R-15 <i>Bacillus</i> sp. 19-B	100
55°Cで分離	
55A-10 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> isolate B	99
55A-11 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> isolate B	99
55AH-1 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> SSCS37	100
55R-7 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> SSCS37	99
55R-9 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> isolate B	99
55RH-4 <i>Bacillus licheniformis</i> strain CICC10085	100
55RH-5 <i>Bacillus licheniformis</i> strain CICC10085	99
H3-1 <i>Brevibacillus thermoruber</i> strain T1E	
H5-1 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> strain K3	99
H5-2 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> strain S11	
H5-3 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> strain S11	
H5-4 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> strain K3	
H7-2 <i>Bacillus</i> sp. E1	97
K-1 <i>Ureibacillus thermosphaericus</i> strain S1	100
K-2 <i>Bacillus</i> sp. SSCS14-2	99
K-3 <i>Bacillus</i> sp. SSCS14-2	
K-4 <i>Bacillus</i> sp. SSCS14-2	

20°Cで分離した株から5株を同定したところ、シベリアの永久凍土から分離された*Exiguobacterium*属細菌が含まれており、この菌に対する興味を持たれた。*Bacillus*属や*Vibrio*属の細菌も存在することが明らかとなった。37°Cで分離された細菌はほとんど*Bacillus*属で、脱窒細菌である*Pseudomonas stutzeri*も分離され環境浄化との関連に興味を持たれた。55°Cで分離した細菌は耐熱性の株が多数を占め、温泉など高温地域でよく分離される細菌が多いことが判明した。

(3) *Esp* Iの各種DNA切断パターン

20°Cで分離された*Exiguobacterium* sp. の生産する制限酵素を*Esp* Iと名づけ認識塩基配列の解明を行った。



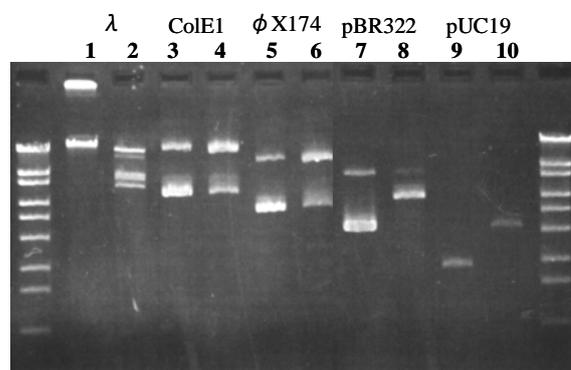
レーン1：マーカー6、レーン2、3：λ DNA、レーン4、5：ColE1 DNA、レーン6、7：φ X174 DNA、レーン8、9：pBR322 DNA、レーン10、11：pUC19 DNA

図1 *Esp* Iの各種DNA切断パターン

図1の結果から、*Esp* Iはλ DNA及びφ X174 DNAを1箇所切断するが、ColE1 DNA、pBR322 DNA及びpUC19 DNAは切断しないことが明らかとなり、*Xho* Iのアイソシゾマーであろうと考えられた。

(4) *Psu* Iの各種DNA切断パターン

37°Cで分離された脱窒細菌*Pseudomonas stutzeri*の生産する制限酵素を*Psu* Iと名づけ、各種DNA切断パターンを検討した。



奇数レーンは未反応

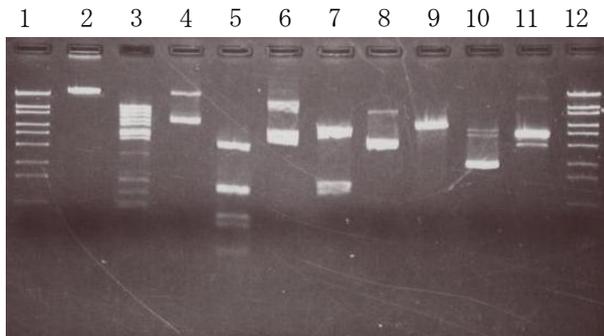
図2 *Psu* Iの各種DNA切断パターン

図2の結果、*Psu* Iはλ DNAを5箇所、pBR322 DNAを1箇所切断し、ColE1 DNA、φ X174 DNA及びpUC19 DNAは切断しないことが明らかとなった。このことから、*Psu* Iは*Bam*H Iのアイソシゾマーであると推定された。

(5) 55°Cで分離した細菌の制限酵素の各種DNA切断パターン

55°Cで分離した細菌の中で制限酵素活性が高かった4種の細菌*Ureibacillus thermosphaericus* strain K3、*Bacillus* sp. E1、*Ureibacillus thermosphaericus* strain S11及び*Bacillus* sp. SSCS14-2の生産する酵素を*Uth*K3 I、*Bsp*E1 I、*Uth*S11 I及び*Bsp*SS Iと命名し、ホ

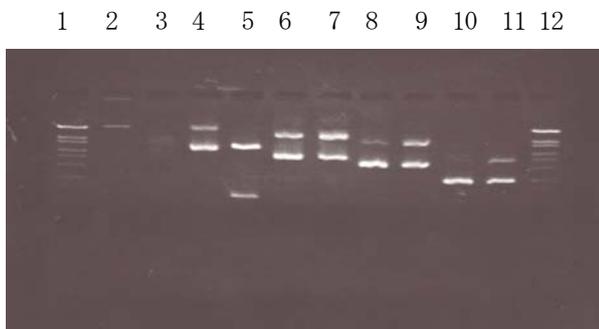
スホセルロースカラムやゲルろ過により部分精製した酵素を調製し、各種DNAを基質とし、切断パターンを検討し認識塩基配列の解析を行った。



レーン1, 12 : マーカー、レーン2, 3 : λ DNA、レーン4, 5 : CoIE1 DNA、レーン6, 7 : ϕ X174 DNA、レーン8, 9 : pBR322 DNA、レーン10, 11 : pUC 19 DNA

図3 *UtH3 I* の各種DNA切断パターン

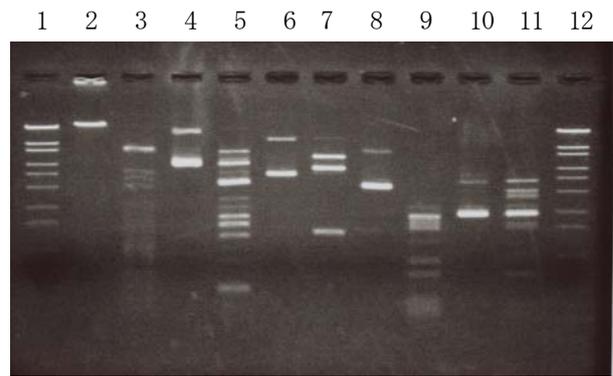
図3の結果から、*UtH3 I* は λ DNAを十数箇所、CoIE1 DNAを5箇所、 ϕ X174 DNAを2箇所、pBR322 DNAを1箇所切断し、pUC19 DNAは切断しないことが明らかになった。この切断パターンは*BsaA I* と同じ切断パターンであり、*BsaA I* のアイソシゾマーであると考えられた。



レーン1, 12 : マーカー、レーン2, 3 : λ DNA、レーン4, 5 : CoIE1 DNA、レーン6, 7 : ϕ X174 DNA、レーン8, 9 : pBR322 DNA、レーン10, 11 : pUC 19 DNA

図4 *BspE1 I* の各種DNA切断パターン

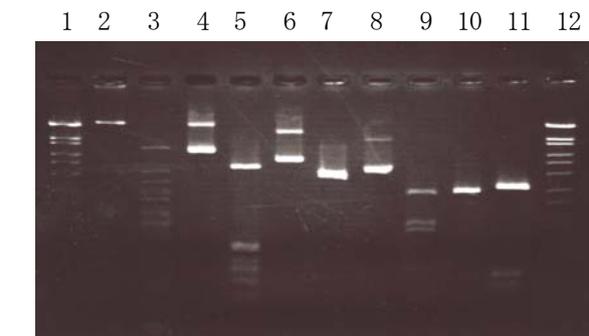
図4の結果、*BspE1 I* は λ DNAを13箇所、CoIE1 DNAを1箇所切断し、 ϕ X174 DNA、pBR322 DNA及びpUC19 DNAは切断しないので、*BstE II* のアイソシゾマーであると推察された。その認識塩基配列はGGTNACCであると考えられた。



レーン1, 12 : マーカー、レーン2, 3 : λ DNA、レーン4, 5 : CoIE1 DNA、レーン6, 7 : ϕ X174 DNA、レーン8, 9 : pBR322 DNA、レーン10, 11 : pUC 19 DNA

図5 *UtH11 I* の各種DNA切断パターン

図5の結果から、*UtH11 I* は λ DNAを16箇所以上、CoIE1 DNAを8箇所、 ϕ X174 DNAを2箇所、pBR322 DNAを20箇所以上、pUC19 DNAを6箇所切断することが明らかとなり、*Sau96 I* のアイソシゾマーであろうと推定された。その認識塩基配列はGGNCCであると考えられた。



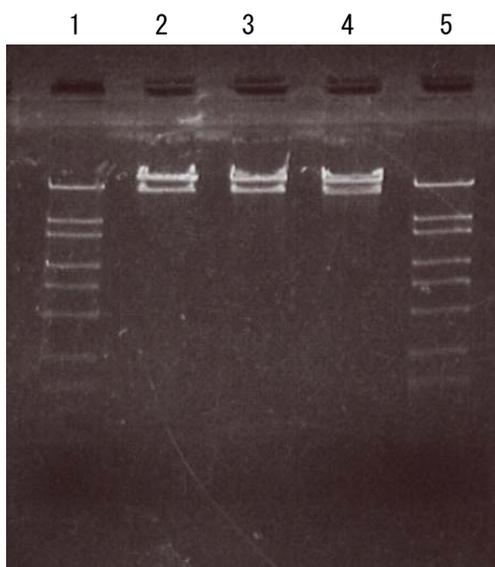
レーン1, 12 : マーカー、レーン2, 3 : λ DNA、レーン4, 5 : CoIE1 DNA、レーン6, 7 : ϕ X174 DNA、レーン8, 9 : pBR322 DNA、レーン10, 11 : pUC 19 DNA

図6 *BspSS I* の各種DNA切断パターン

図6に示すように、*BspSS I* は λ DNAを数十箇所、CoIE1 DNAを10箇所以上、 ϕ X174 DNAを2箇所、pBR322 DNAを6箇所、pUC19 DNAを5箇所切断し、*EcoR II* のアイソシゾマーであると考えられた。従ってその認識塩基配列はCWGGであると考えられた。

(6) ダブルダイジェクションによるアイソシゾマーの確認

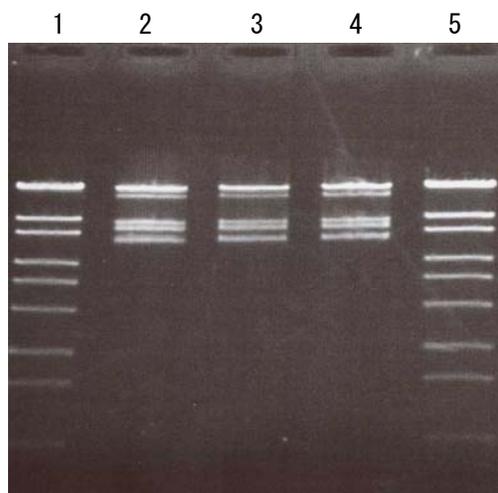
上記のように有明海から分離された細菌の生産する6種のII型制限酵素が認識する塩基配列が推定されたことから、それぞれのアイソシゾマーの確認を行った。



レーン1, 5: マーカー、レーン2: *Xho* I、
レーン3: *Xho* I + *Esp* I、レーン4: *Esp* I

図7 *Esp* I及び*Xho* IによるλDNAのダブルダイジェクション

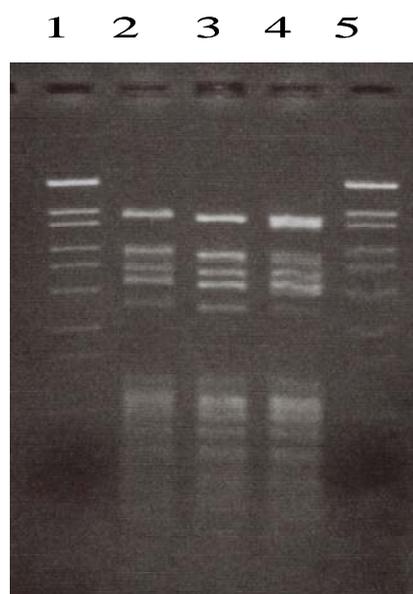
図7に示すように、*Esp* I及び*Xho* IのλDNA切断パターンは同じであり、両酵素を作用させても切断パターンに変化はなかったため、*Esp* Iは*Xho* Iのアイソシゾマーであることが確認された。



レーン1, 5: マーカー、レーン2: *Psu* I、
レーン3: *Psu* I + *BanH* I、レーン4: *BanH* I

図8 *Psu* I及び*BanH* IによるλDNAのダブルダイジェクション

図8の結果から、*Psu* Iは*BanH* Iのアイソシゾマーであることを確認した。



レーン1, 5: マーカー、レーン2: *UtlS11* I、
レーン3: *UtlS11* I + *Sau96* I、レーン4: *Sau96* I

図9 *UtlS11* Iと*Sau96* IによるλDNAのダブルダイジェクション

55°Cで分離した細菌の制限酵素の中で、*UtlS11* IはλDNA切断パターンが*Sau96* Iと同じであり、両者による切断パターンの変化もないことから*Sau96* Iのアイソシゾマーであることを確認した。

(7) 分離した制限酵素生産菌の生育温度

有明海から20°C、37°C及び55°Cで分離した制限酵素生産菌の生育温度についてその範囲を検討した。

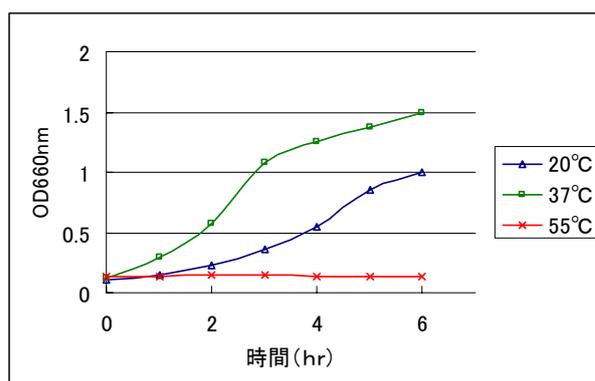


図10 *Exiguobacterium* sp. の各温度における生育曲線

シベリアの永久凍土から分離されたとされる *Exiguobacterium* 属細菌は、20°Cで最もよく成育し、55°Cでは生育しなかった。

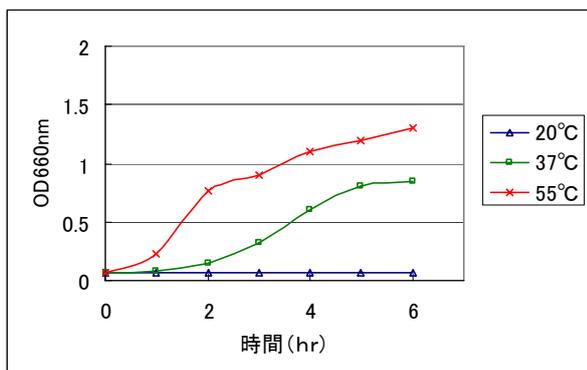


図 1 1 *Bacillus* sp. SSS14-2の各温度における生育曲線

一方 55°C で分離した *Bacillus* 属細菌は 20°C では生育せず、55°C で最もよく生育した。このように、有明海から分離した細菌群は低温から高温に渡って幅広い生育温度域の多種のものが生息することが明らかになり、有明海の生物の多様性を基盤となっていると考えられた。

(8) 各制限酵素の性状

各制限酵素の性状を表 5 に示す。細菌を分離した温度が異なると、酵素の反応温度や反応塩濃度が異なり、生産菌の生育環境に適した反応条件が必要であると考えられる。

表 5 各種制限酵素の性状

酵素名 (分離温度)	反応温度 (°C)	NaCl 濃度 (mM)	認識塩基配列
<i>Esp</i> I (20°C)	0~75	0~100	CTCGAG
<i>Psu</i> I (37°C)	20~60	0~100	GGATCC
<i>Utl</i> K3 I (55°C)	35~85	0~100	YACGTR
<i>Bsp</i> E1 I (55°C)	50~60	5~75	GGTNACC
<i>Utl</i> S1 I (55°C)	45~80	0~100	GGNCC
<i>Bsp</i> SS I (55°C)	0~65	0~250	CCWGG

(Y=C/T, R=A/G, W=A/T, N=A/C/G/T)

3. まとめ・考察

有明海より分離温度を 20°C、37°C 及び 55°C と変えて分離した 24 株について制限酵素活性を検索した結果、54 株が制限酵素活性を有していた。これらの λDNA 切断パターンから制限酵素活性の高い 6 種について菌株の同定を行った。また、部分精製を行った制限酵素による種々の基質 DNA の切断パターンから、認識塩基配列の解析を行った。

多くの制限酵素生産菌を分離したが、分離温度の違いにより生育温度の違いが見られ、生産される制限酵素の性状にも違いが見られたことは有明海には多様な微生物が生息し、それぞれが複雑に影響しあっていることを示すものと考えられた。

謝辞： 土壌サンプルをご供与頂いた有明水産振興センター・三根崇幸氏に感謝します。

参考文献

- Meselson, M., and R. Yuan, DNA Restriction enzyme from *Escherichia coli*, Nature (London) 217, 1110-1114, 1968.
- Arber, W., DNA modification and restriction, Prog. Nucleic Acid Res. Mol. Biol. 14, 1-37, 1974.
- Linn, S., J. A. Lautenberger, B. Eskin, and D. Lackey, Host-controlled restriction and modification enzymes of *E. coli* B, Fed. Proc., 33, 1128-1134, 1974.
- Christoph Kessler, Peter S. Neumaier and Werner Wolf, Recognition sequences of restriction endonucleases and methylases — a review, Gene, 33, 1-102, 1985.
- 安藤 忠彦, 柴田 武彦, 風見 潤, 制限酵素, 蛋白質・核酸・酵素, 30, 1429-1445, 1985.
- H-R. Kariminiaae-Hamidaani, K. Kanda, and F. Kato, Denitrification activity of the Bacterium *Pseudomonas* sp. AMS-2-3 isolated from the Ariake sea tideland, J. Biosci. Bioeng., 97, 39-44, 2004.
- 加藤富民雄, 増子朝貞, 神田康三, 有明海干潟から分離した細菌の II 型制限酵素に関する研究、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 [第 1 巻], 93-96, 2005.
- 加藤富民雄, 村田昌子, 神田康三, 小林元太, 有明海に生息する細菌の生産する II 型制限酵素、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 [第 2 巻] 95 - 98, 2006.

(2007. 3. 19 受付)

有明海由来のキシロース資化性 新奇乳酸菌に関する研究

A STUDY OF NOVEL LACTIC ACID PRODUCER
UTILIZING XYLOSE IN ARIAKE SEA

小林元太¹・岡宏圭²・田代幸寛³・加藤富民雄⁴・林信行⁴

Genta KOBAYASHI, Hiroyoshi OKA, Yukihiro TASHIRO, Fumio KATO and Nobuyuki
HAYASHI

¹農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農学部応用生物科学科4年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農博 佐賀大学講師 (研究機関研究員) 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Although about 16 million tons per year of agricultural wastes such as rice hull and straw were generated and the part is used for feed or the compost, about 1.4 million tons were burned, and loads is applied not a little to environment. The concern about environment such as disposal of agricultural waste, the problem of fossil resources drain and global warming problem, are increasing further. Therefore, the production of bulk chemicals/biofuels from renewable resources by fermentation and downstream process has been attempted in recent years. In general, plant biomass is consisted of cellulose, hemicellulose and lignin, and constituent monosaccharide of cellulose is glucose which is hexose, while constituent monosaccharide of hemicellulose is pentose such as xylose. Many microorganisms can use glucose but microorganism utilizing xylose was a few. Then it is difficult to utilize hemicellulose by fermentation. An effective utilization of hemicellulose is expected by fermentation using microorganism utilizing xylose. The aims of this study were to isolate and characterize novel lactic acid producer utilizing xylose from tideland in Ariake sea.

Key Words: Lactic acid fermentation, Xylose utilization, Biomass

1. 序論

もみ殻や麦わらなどの農産廃棄物は年間約1600万トン発生し、一部は飼料や堆肥に利用されているが、約140万トンは焼却処分され¹⁾、少なからず環境に負荷をかけている。このような農産廃棄物の廃棄、また化石資源枯渇化の問題、さらには地球温暖化問題など、環境に対する関心が高まっている。そのため、近年、バイオマスを循環型有機資源として微生物による有用物質への変換が試みられている。一般的に植物バイオマスはセルロース、ヘミセルロース、リグニンからなり、セルロースはヘキソースであるグルコースを構成単糖としているのに対し、ヘミセルロースはキシロースやアラビノースなどのペントースを構成単糖としている。グルコースに比べ、キシロースを資化できる微生物は少ないため、ヘミセルロースの利用はセルロースより

も困難と考えられている。そのため、ヘミセルロースやその加水分解物であるキシロースやキシロオリゴ糖の有効利用法の確立が望まれている。キシロースやキシロオリゴ糖を資化できる微生物を用いることにより、ヘミセルロース資源の有効利用が期待される。

これまでに微生物を利用してキシロースから有用物質生産²⁾を行った例としては、酵母によるエタノール生産³⁾やキシリトール生産⁴⁾が挙げられる。

一方、乳酸菌では、*Lactobacillus pentosus*、*Lactobacillus brevis*、*Lactobacillus delbrueckii*、*Lactobacillus xylosus*などによるキシロースからの乳酸生産が報告されている⁵⁾。しかし、キシロースからの効率的な乳酸発酵に成功した例は少ない。九州大学で分離した*Lactococcus lactis* IO-1 (JCM 7638)はキシロース資化性に優れ、高収率でL-乳酸を生産することが明らかとなっている⁶⁾。

これまで、キシランやキシロオリゴ糖の代謝に関し

て他の微生物では報告されているが、乳酸菌ではほとんど報告されていない。そこで本研究では有明海干潟を分離源として、キシロース資化性を有する新奇乳酸菌の分離・同定を試みた。

2. 実験方法

2-1 有明海干潟中からの乳酸菌分離

2-1-1 分離源

有明海の4地点の干潟（芦刈干潟、早津江川自動観測塔、428鋼管、六角川自動観測塔）にて採取された干潟泥を分離源として用いた。

2-1-2 分離手法

- ① 表2-1に示すキシロース含有 MRS 培地に分離源を少量入れ、30℃で集積培養を行った。
- ② CaCO₃含有MRS-xyloseプレートまたはCaCO₃含有MRSプレートに画線し、30℃で数日間培養した。また、同様にして、酸素吸収剤であるアネロパックケンキ（三菱ガス化学）を用いた嫌気条件下でも培養を行った。
- ③ コロニーの周りにクリアゾーンを形成した菌株を釣菌し、MRS-xyloes 培地で静置培養した。
- ④ 培養液を遠心分離操作（10000 rpm、10 min）を行い、得られた菌体ペレットに 3%過酸化水素水溶液を 1 mL 加え、カタラーゼ試験を行った。発泡が見られなかったカタラーゼ陰性菌をキシロース資化性菌として分離した。

表2-1 キシロース含有MRS (MRS-xylose) 培地

Peptone	10 g/L
Meat extract	8 g/L
Yeast extract	4 g/L
Tween 80	1 mL/L
K ₂ HPO ₄	2 g/L
CH ₃ COONa · 3H ₂ O	5 g/L
Tri-ammonium citrate	2 g/L
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.2 g/L
MnSO ₄ · 4H ₂ O	0.05 g/L
Xylose	10-40 g/L

上記の成分を蒸留水に溶解し、pH 6.5に調整した。121℃で15分間、オートクレーブによって滅菌を行った。褐変を防ぐため、Xyloseと他の培地成分は別殺菌し、オートクレーブ滅菌後に混合した。

寒天平板培地は、上記のMRS-xylose培地に1.5% 寒天、0.5% CaCO₃、100 ppm アジ化ナトリウム、100 ppm シクロヘキシミドを加え、蒸留水に溶解し、pH 6.5に調整することにより調製した。121℃で15分間、

オートクレーブによって滅菌を行った。褐変を防ぐため、Xyloseと他の培地成分は別殺菌し、オートクレーブ滅菌後に混合した。その後、滅菌シャーレに注ぎ、寒天培地を作製した。

MRS-xylooligosaccharide培地は市販キシロオリゴ糖をキシロースと代替して同様に調製した。

2-1-3 菌株の保存

菌株の保存はMRS-xylose培地を用いて、30℃で24時間静置培養した培養液1 mLとグリセロール1 mLをバイアルに分注し、-80℃で保存する凍結保存法を用いた。実験に際して室温で解凍し使用した。

2-1-4 培養試験

2-1-4-1 試験管培養

2-1-4-1-1 リフレッシュ

バイアルを室温で解凍後、MRS-xylose培地10 mLに100 μL接種し、30℃で24時間静置培養した。

2-1-4-1-2 本培養

中型試験管に9 mLの1.0% CaCO₃含有MRS-xylose培地を入れ、リフレッシュから張り込み量の10%(v/v)にあたる1 mLを接種した。その後、30℃で12時間振とう培養した。

2-1-4-2 フラスコ培養

2-1-4-2-1 リフレッシュ

バイアルを室温で解凍後、MRS-xylose培地10 mLに100 μL接種し、30℃で24時間静置培養した。

2-1-4-2-2 本培養

300 mL容三角フラスコに90 mLの1.0% CaCO₃含有MRS-xylose培地を張り込み、リフレッシュから10%(v/v)を接種した。その後、30℃で振とう培養した。

2-1-4-3 ジャー培養

2-1-4-3-1 前培養

100 mL容三角フラスコに36 mLのMRS-xylose培地を張り込み、リフレッシュから10%(v/v)を接種した。その後、30℃で12時間静置培養した。

2-1-4-3-2 本培養

1 L容ジャーフェーマンターに360 mLのMRS-xylose培地を入れ、前培養から張り込み量の10%(v/v)にあたる40 mLを接種した。かくはん速度を100rpmで回分培養を行った。温度は25-43℃に任意に制御し、pHはpH

コントローラーにより5.5-7.0に任意に制御した。

2-1-5 分析方法

2-1-5-1 菌体濃度

培養液の562 nmにおける濁度(OD₅₆₂)を分光光度計 (BioSpec-1600, Shimadzu) により測定した。OD₅₆₂は0.5以下になるように希釈して測定した。

2-1-5-2 糖および生産物濃度

高速液体クロマトグラフィー (HPLC) により測定した。遠心分離 (10000 rpm, 10 min) により得られた培養液上清を孔径0.45 μmのフィルター (Ekicrodisc 13, Gelman Japan) にてろ過し、供試サンプルとした。

<HPLCの条件>

- ・送液装置 L-2130 (日立)
- ・RI検出器 L-2490 (日立)
- ・カラム SUGAR SH1011 (Shodex)
- ・カラム温度 50°C
- ・移動相 3 mM HClO₄
- ・流速 1.0 mL/min

2-1-6 分離株の同定

2-1-6-1 形態観察

位相差顕微鏡 (ECLIPSE 80i, ニコン、日本) を用いて細胞の形態を観察した。

2-1-6-2 完全16S rDNAのシーケンス解析

分離菌株のゲノムDNAを抽出するために平板培地上のコロニーもしくは液体培養液を遠心分離操作により菌体を回収した。さらにゲノム抽出キットであるQIAmp DNA Mini Kit (QIAGEN, USA)によりゲノムDNAを抽出し、そのDNAを鋳型として、表2-2に示す全細菌ユニバーサルプライマーを用いてPCR反応を行い、完全16S rDNA (約1.5 kb) を増幅した。

表2-2 プライマー配列

8-519S	5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3'
1510r-feace	5'-GTG AAG CTT ACG GYT ACC TTG TTA CGA CTT-3'

反応液組成を表2-3に示す。

表2-3 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq (タカラバイオ、日本)	25.0
Primer Forward (8-519S)	4.0
Primer Reverse (1510r-feace)	4.0
Template DNA	0.5-2.0
H ₂ O	15-16.5

Total	50.0
-------	------

PCR反応は以下の条件 (変性95°C 30 sec、アニーリング55°C 30 sec、伸長72°C 1 min; 30 cycles) でTグラジェントサーモサイクラー96 (バイオメトラ、ドイツ) を用いて行った。

反応条件

95°C	5 min	} 30 cycles
95°C	30 sec	
55°C	30 sec	
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.2%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キット、QIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN, USA) を用いてPCR産物を精製した。

得られたPCR産物をライゲーションキットTA-Blunt Ligation Kit (ニッポンジーン、日本) を用いてpGEM-T Easy Vector (Promega, USA) にTAクローニングを行い、16°Cで1晩反応させた。反応液組成を表2-3に示す。

表2-4 ライゲーション反応液組成

Reagent	Volume (μL)
pGEM-T Easy Vector (Promega)	1.0
10×Enhancer Solution	1.0
5×Ligation Mix	2.0
Purified PCR product	3.0
H ₂ O	3.0
Total	10.0

ライゲーション反応液2 μLをコンピテントセル *Escherichia coli* JM109 (TOYOBO, 日本) 25 μLに加えて、42°Cで47 secヒートショックを行い、*E. coli* JM109を形質転換した。形質転換後、表2-5の組成のLBプレートに塗布して37°Cで1晩培養した。形成したコロニーの色 (白/青) を観察し、白コロニーを選抜した。

表2-5 LBプレート組成

Reagent	
Tryptone	10 g
Yeast extract	5 g
NaCl	5 g
アンピシリンナトリウム	100 mg
IPTG	100 μmol
X-Gal	10 mg
寒天末	15 g

得られた白コロニーを直接鋳型として、表2-6に示すM13プライマーを用いたコロニーPCRにより、

16S rDNA断片 (1.5kbp) インサートの有無を確認した。

表 2-6 M13プライマー配列

M13F	5'-CGC CAG GGT TTT CCC AGT CAC GAC-3'
M13R	5'-TCA CAC AGG AAA CAG CTA TGA C-3'

反応液組成を表 2-7 に示す。

表 2-7 コロニーPCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
KOD Dash (TOYOBO、日本)	0.1
Buffer	1.0
dNTPs	1.0
Primer Forward (M13F)	0.1
Primer Reverse (M13R)	0.1
H ₂ O	7.7
Total	10.0

PCRは以下の反応条件 (変性94°C 30 sec、アニーリング52°C 30 sec、伸長74°C 70 sec; 30 cycles) でTグラジエントサーモサイクラー96を用いて行った。

反応条件

94°C	5 min	} 30 cycles
94°C	30 sec	
52°C	30 sec	
74°C	70 sec	
74°C	7 min	

反応終了後に反応液を0.8%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを検出したコロニーをクローンとした。

得られたクローンを100 mg/Lアンピシリン含有LB培地に植菌して温度37°C、振とう速度200 rpmで16時間培養した。遠心分離操作 (13,000×g, 5 min) により培養液3 mLから回収した菌体をHigh Pure Plasmid Isolation Kit (ロシュ、スイス) を用いてプラスミドを抽出した。得られたプラスミドは微量分光光度計NanoDrop ND-100RPにてDNA収量を測定した。得られたプラスミドを1.0%アガロースゲル電気泳動に供してプラスミドを確認した。

プラスミドの塩基配列を決定するために、ジーンネット (株) (日本) にシーケンス解析を依頼した。得られた配列は、データベース (BLAST program of the National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>) で相同性検索を行った。

3. 実験結果

3-1 有明海干潟中からの乳酸菌分離

3-1-1 キシロース資化性乳酸菌の分離

有明海干潟泥から、キシロース資化能を有したカタラーゼ陰性酸生産菌を約100株分離した。

3-1-2 乳酸生産能の検討

3-1-1で分離した菌株をMRS-xylose培地で液体培養を行い、キシロース消費量、乳酸生産量および対キシロース収率等を調べた結果、表3-1中の8株が高い値を示した。

表 3-1 分離菌株の乳酸発酵能

菌株名	糖消費量(g/l)	乳酸生産量(g/l)	収率(g/g)
71	10.8	8.37	0.775
72	10.9	7.99	0.733
73	10.5	8.27	0.788
n1.1	10.8	8.56	0.793
n1.2.1	18.2	12.0	0.659
n4.1	13.3	8.42	0.633
n4.2	13.3	8.42	0.633
n4.3	12.9	8.19	0.635

3-1-3 分離したn1.2.1株の同定

3-1-2で最も乳酸生産量が高かったn1.2.1株の同定を行った。16S rDNA配列のBLAST解析の結果、GeneBank Accession numbers DQ523492、AB266535、AB024299、AJ422044、AY929284等の*Lactobacillus brevis*の16S rRNA配列と約99%の相同性を有することが明らかとなった。また位相差顕微鏡により桿菌であることが分かった。これらのことより、本菌株を*Lactobacillus brevis* n1.2.1と同定した。

表 3-2 n1.2.1株の16S rDNA配列に基づくBLAST解析結果

	Homology (%)
<i>Lactobacillus brevis</i> strain LA122 (DQ523492)	99.4
<i>Lactobacillus brevis</i> strain FERM BP-4693 (AB266535)	99.4
<i>Lactobacillus brevis</i> strain NRIC 1684 (AB024299)	99.3
<i>Lactobacillus brevis</i> strain ACA-DC 3401 (AJ422044)	99.2
<i>Lactobacillus brevis</i> strain BFE 6673 (AY929284)	98.6

3-1-4 *Lactobacillus brevis* n1.2.1の至適温度の検討

Lactobacillus brevis n1.2.1株の至適温度を調べるため

に、初発キシロース濃度を20(g/l)に調製したMRS-xylose培地を用いて、温度条件をそれぞれ25、30、37、43℃としたフラスコスケールでの回分培養を行った。その時の乳酸生産とキシロース消費の経時変化を図3-1、3-2に示す。

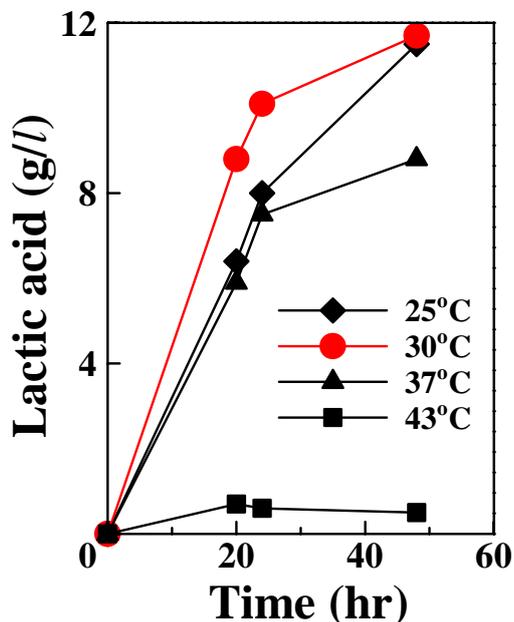


図3-1 乳酸生産に及ぼす培養温度の影響

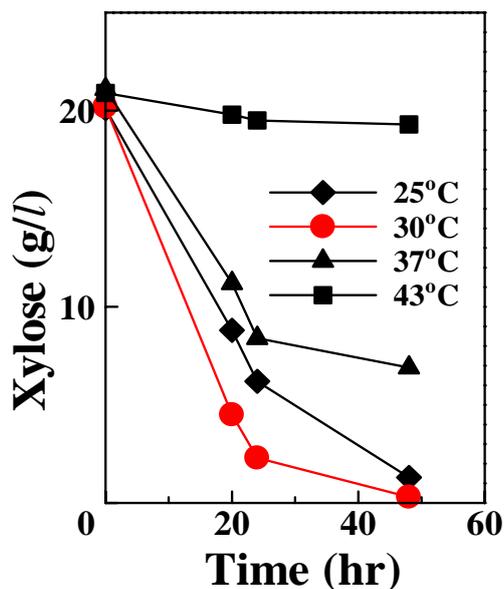


図3-2 キシロース資化に及ぼす培養温度の影響

乳酸生産量、乳酸生産速度およびキシロース資化速度から、温度30℃を至適条件と決定した。

3-1-4 *Lactobacillus brevis* n1.2.1の至適pHの検討

Lactobacillus brevis n1.2.1株の至適pHを調べるために、初発キシロース濃度を40(g/l)に調製したMRS-xylose培地を用いて、pH条件をそれぞれ5.5、6.0、6.5、7.0としたフラスコスケールでの回分培養を行った。その時の乳酸生産とキシロース消費の経時変化を図3-

3、3-4に示す。

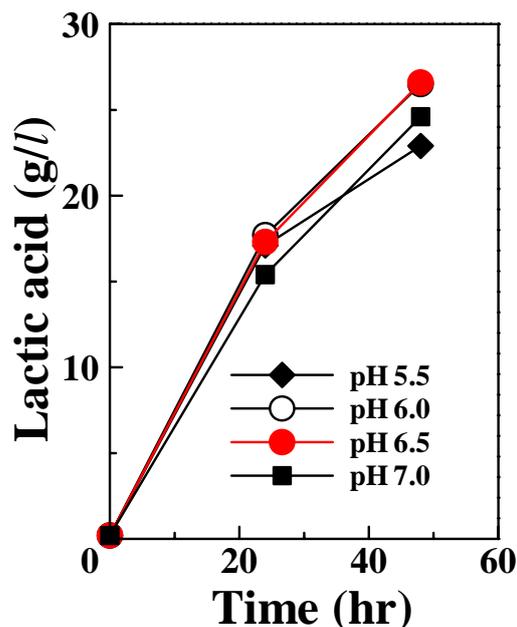


図3-3 乳酸生産に及ぼすpHの影響

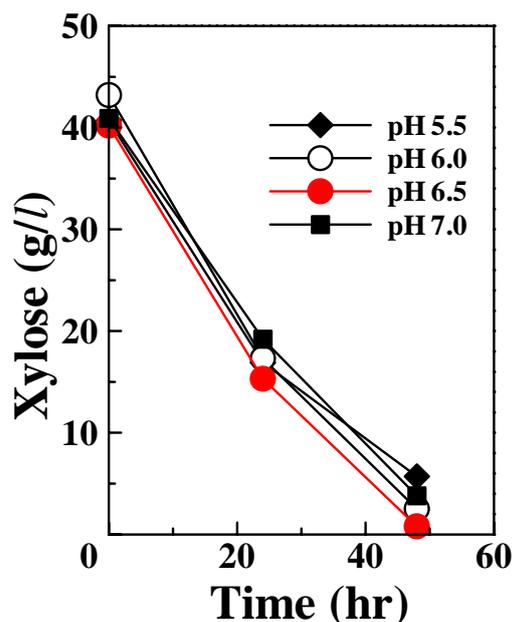


図3-4 キシロース資化に及ぼすpHの影響

乳酸生産量、乳酸生産速度およびキシロース資化速度から、pH6.0および6.5が好適条件と判断された。

3-1-5 *Lactobacillus brevis* n1.2.1の至適pHの詳細な検討

3-1-4では、pH6.0および6.5が好適条件であることが判明したが、フラスコ培養によるものであったので、pHコントローラーを用いてpHを制御したジャー培養を行い、至適pHを検討した。初発キシ

ローズ濃度を40(g/l)に調製したMRS-xylose培地を用いて、pHを6.0と6.5にコントロールした回分培養を行った。その時の乳酸生産、キシロース消費、菌体増殖量の経時変化を図3-5に示す。

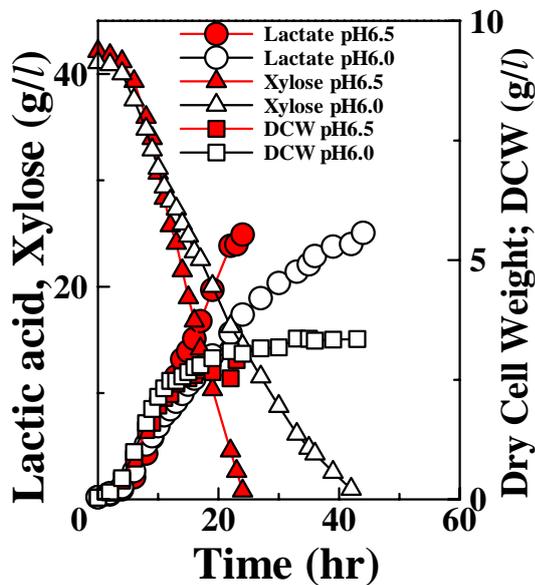


図3-5 pHコントロール時の培養経時変化

図3-5に示すように、総乳酸生産量はpHを6.0と6.5にコントロールした場合のどちらも24-25(g/l)と差はなかったが、pH6.5にコントロールした場合は培養24時間目でキシロースをほぼ資化しつくし、その時の乳酸生産速度は1.0(g/g/h)であったのに対して、pH6.0にコントロールした場合の24時間目ではキシロースは14(g/l)以上残存しており、その時の乳酸生産速度は0.73(g/g/h)であった。よって、至適pHを6.5と決定した。

4. 結論

4-1 有明海干潟中からの乳酸菌分離

有明海干潟泥中から100株余りのキシロース資化性乳酸生産菌を分離した。これらはほとんどがカタラーゼ陰性であったことから乳酸菌であると推察される。これらの乳酸生産能やキシロース資化能から、n1.2.1株を選抜し同定を行った。16S rRNA配列解析の結果より、n1.2.1株を*Lactobacillus brevis*と同定した。本株の至適培養条件を決定するために至適温度とpHを検討した結果、温度30℃とpH6.5が至適条件であると決定した。Gardeらは*Lactobacillus brevis*を用いて麦わら由

来へミセルローズ加水分解物を原料に乳酸発酵を行っているが、本株によるキシロースを原料とした乳酸生産量や対キシロース乳酸収率等はGardeら⁷⁾の結果に遜色ないものであった。また、本株が市販キシロオリゴ糖を資化することも既に明かとしており、キシロオリゴ糖からも乳酸発酵が可能である。今後はさらなる効率的乳酸発酵システムの構築が望まれる。

本研究により、有明海には数多くの乳酸菌が生息していることが明らかとなった。今回、分離同定した菌株は*Lactobacillus brevis*であり、カゴメ株式会社が販売している飲料「植物性乳酸菌ラブレ」と同じ菌種であったことから、有明海中には機能性ペプチドや生理活性物質を産生する乳酸菌が数多く存在するものと推測する。今後は生理活性作用を有する有用乳酸菌の分離についても検討する予定である。

謝辞：泥・海水サンプルをご提供いただいた佐賀県有明水産振興センターの川村嘉応博士および三根崇幸研究員に深謝するものである。

参考文献

- 1) <http://group.lin.go.jp/leio/tkj/tkj02/tokush02.html>
- 2) Saha B. C.: Hemicellulose bioconversion., *J Ind Microbiol Biotechnol*, 30, 279-291, 2003.
- 3) Strmth, H.K., and Jeffries, T.W.: Production of ethanol from wood hydrolyzate by yeast., *Biores. Technol.*, Vol. 72, pp. 253-260, 2000.
- 4) Kim, S. Y., Oh, D. K., and Kim, J. H.: Evaluation of xyloitol production from corn cob hemicellulose hydrolysate by *Candida parapsilosis*., *Biotechnol Lett*, Vol. 21, pp. 891-895, 1999.
- 5) Hofvendahl, K., and Hahn-Hagerdal, B.: Factors affecting the fermentative lactic acid production from renewable resources., *Enzyme Microb Technol*, Vol. 26, pp. 87-107, 2000.
- 6) Ishizaki, T. Ueda, Tanaka, K. and Stanbury, P. F.: L-Lactate production from xylose employing *Lactococcus lactis* IO-1., *Biotechnol Lett*, Vol. 14, pp. 599-604, 1992.
- 7) Garde, A., Jonsson, G., Schmidt, A. S., and Ahring, B. K.: Lactic acid production from wheat straw hemicellulose hydrolysate by *Lactobacillus pentosus* and *Lactobacillus brevis*., *Biores. Technol.*, Vol. 81, pp. 217-223, 2002.

(2007. 3. 19受付)

有明海干潟泥中の細菌相解析とビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリオファージの分離

ANALYSIS OF BACTERIAL FLORA IN ARIAKE SEA TIDELAND AND ISOLATION OF BACTERIOPHAGE INFECTIOUS TO *Vibrio vulnificus*

田代幸寛¹・光武奈緒子²・小林元太³・加藤富民雄⁴

Yukihiro TASHIRO, Naoko MITSUTAKE, Genta KOBAYASHI and Fumio KATO

¹農博 佐賀大学講師 (研究機関研究員) 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²農学部応用生物科学科3年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Bacterial flora is shown to contribute to the environmental ecology. The bacterial flora in Ariake Sea or its contribution to ecology is poorly understood. In this study, we aimed at analyzing the bacterial flora in Ariake Sea tideland. We carried out an extraction of genome from Ariake Sea tideland, PCR, cloning, extraction of plasmid, and sequence of 16S rDNA fragment. Total 579 sequence analyses indicated that 83.7–91.4% of bacteria showed the homology with uncultured bacteria and four positions in Ariake Sea tideland consisted of different bacterial flora.

Many infections of *Vibrio vulnificus* are reported by ingestion of contaminated seafood or exposure of wounds to seawater derived from Ariake Sea. We aimed at establishing a novel method of this disease, namely phage therapy using bacteriophage. We isolated four bacteriophages infectious to *Vibrio vulnificus* NBRC15645^T from Ariake Sea water. Those bacteriophages did not infect two clinical strains isolated from patients.

Key Words : Bacterial flora, 16S rDNA sequence analysis, *Vibrio vulnificus*, Bacteriophage,

1. 序論

有明海は九州最大の湾である。その干満の差は6 m以上にも達し、干潮時には日本最大の広さの干潟が出現することが知られている。干潟一帯ではクチゾコ、アサリ、サルボウ、タイラギ等の漁業やノリ養殖業などの産業が古くから行われ、有明海はまさに「宝の海」として我々は恩恵を受けている。ところが近年では、有明海における漁業量の減少やノリの色落ちによる被害などが確認されており、有明海の生態系の変化が危惧されている。

細菌は様々な環境中に存在しており、硫酸化細菌¹⁾やアンモニア酸化細菌²⁾などのように環境中における物質変換や物質循環に関わっていることが明らかとなっている。一方、細菌は食物連鎖の原点に位置することから、細菌より高等な生物の捕食対象つまり餌としての役割を担っていることが明らかとなっている³⁾。すなわち、あらゆる環境中の生態系にはそこに存在している細菌の寄与が大きいことが一般的に認められている。同様に有明

海においても、様々な細菌が物質変換や物質移動に関与し、また様々な生物の餌としての役割を果たしていることが容易に推察できる。しかし、有明海に存在する細菌相やその生態系におよぼす影響はいまだ明らかとなっていない。そこで本研究では、有明海に存在する細菌を決定して有明海の生態系変化のメカニズムの解明を目的とし、有明海の細菌相解析を行った。

また有明海では、“人食いバクテリア”と称されるビブリオ・バルニフィカス (*Vibrio vulnificus*) による感染症 (ビブリオ・バルニフィカス感染症) が問題となっている。国内発症例の約半数が有明海周辺地域で報告され、その致死率は50-70%であることから本感染症はまさに有明海風土病である。佐賀大学医学部付属病院ではバルニフィカス感染症患者を受け入れて治療を行っているが、18症例のうち4例しか救命できておらず⁴⁾本感染症に適した治療方法の開発は急務である。従来ではビブリオ・バルニフィカス感染症の治療として抗菌薬の投与が行われているが、効果が小さいことや多大な副作用を引き起こすために有効ではない。一方、バクテリオファージは宿

主に対する感染力が非常に強く、宿主への特異性が高いことからファージセラピーへの応用が報告されている⁵⁾。そこで本研究では、ビブリオ・バルニフィカス感染症の新規な治療方法としてファージセラピーの開発を目的とし、ビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリオファージの分離を行った。

2. 実験方法

2-1 16S rDNAシーケンスによる有明海干潟泥中の細菌相解析

従来の細菌相解析には、培養法により純粋分離する方法が用いられていたが、培養条件（培地組成、pH、温度、溶存酸素濃度 etc.）に依存して分離できる細菌がまったく異なることが問題として挙げられる。近年では、環境中より全細菌のDNAを抽出して、PCRにより16S rDNA断片を増幅後、そのシーケンスを解析する分子生物学的手法により細菌相解析を行う方法が一般的である⁶⁾。本研究でも分子生物学的手法による有明海干潟泥中の細菌相解析を行った。

2-1-1 有明海の干潟泥

有明海の4地点の干潟（芦刈干潟、早津江川自動観測塔、428鋼管、六角川自動観測塔）から平成18年4月～平成18年12月までに毎月採取された干潟泥を試料として用いた。

2-1-2 干潟泥からのDNA抽出

干潟泥からのDNA抽出には土壌DNA抽出キットISOIL for Beads Beating（ニッポンジーン、日本）を用いた。干潟泥中の菌体破碎にはビーズ式細胞破碎装置MicroSmash MS-100R（トミー精工、日本）を用いた。破碎条件は4200 rpm、45 secとした。得られたDNAは微量分光光度計NanoDrop ND-100RP（NanoDrop Technologies、USA）にてDNA収量を測定した。

2-1-3 PCRによる完全16S rDNAの増幅

2-1-2で抽出したDNAを鋳型として、表2-1に示す全細菌ユニバーサルプライマーを用いて、PCRにより完全16S rDNA（約1.5 kb）を増幅した。

表2-1 プライマー配列

8-519S	5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3'
1510r-feace	5'-GTG AAG CTT ACG GYT ACC TTG TTA CGA CTT-3'

反応液組成を表2-2に示す。

表2-2 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq (タカラバイオ、日本)	25.0
Primer Forward (8-519S)	4.0
Primer Reverse (1510r-feace)	4.0
Template DNA	0.5-2.0
H ₂ O	15-16.5
Total	50.0

PCRは以下の反応条件（変性95°C 30 sec、アニーリング55°C 30 sec、伸長72°C 1 min; 30 cycles）でTグラジエントサーモサイクラー96（バイオメトラ、ドイツ）を用いて行った。

反応条件

95°C	5 min	} 30 cycles
95°C	30 sec	
55°C	30 sec	
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.2%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キットQIAquick PCR Purification Kit（QIAGEN、USA）を用いてPCR産物を精製した。

2-1-4 TAクローニングと大腸菌への形質転換

ライゲーションキットTA-Blunt Ligation Kit（ニッポンジーン、日本）を用いて 2-1-3で得られたPCR産物をpGEM-T Easy Vector（Promega、USA）にTAクローニングを行った。反応液組成を表2-3に示し、16°Cで1晩反応させた。

表2-3 ライゲーション反応液組成

Reagent	Volume (μL)
pGEM-T Easy Vector (Promega)	1.0
10×Enhancer Solution	1.0
5×Ligation Mix	2.0
Purified PCR product	3.0
H ₂ O	3.0
Total	10.0

ライゲーション反応液2 μLをコンピテントセル*Escherichia coli* JM109（東洋紡、日本）25 μLに加えて、42°Cで47 secヒートショックを行い、*E. coli* JM109を形質転換した。形質転換後、表2-4の組成のLBプレートに塗布して37°Cで1晩培養した。形成したコロニーの色（白/青）を観察し、白コロニーを選抜した。

表2-4 LBプレート組成

Reagent	
Tryptone	10 g
Yeast extract	5 g
NaCl	5 g
アンピシリンナトリウム	100 mg
イソプロピル-β-D-チオ ガラクトピラノシド	100 μmol
5-ブロモ-4-クロロ-3-インドリル- β-D-ガラクトピラノシド	10 mg
寒天末	15 g
脱イオン水	1 L

2-1-5 コロニー-PCR

2-1-4で得られた白コロニーを直接鋳型として、表2-5に示すM13プライマーを用いて、コロニー-PCRにより、16S rDNA 1.5 kb断片のインサートの有無を確認した。

表2-5 プライマー配列

M13F	5'-CGC CAG GGT TTT CCC AGT CAC GAC-3'
M13R	5' -TCA CAC AGG AAA CAG CTA TGA C-3'

反応液組成を表2-6に示す。

表2-6 コロニー-PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
KOD Dash (東洋紡、日本)	0.1
Buffer	1.0
dNTPs	1.0
Primer Forward (M13F)	0.1
Primer Reverse (M13R)	0.1
H ₂ O	7.7
Total	10.0

PCRは以下の反応条件 (変性94°C 30 sec、アニーリング52°C 30 sec、伸長74°C 70 sec; 30 cycles) でTグラジエントサーモサイクラー96を用いて行った。

反応条件

94°C	5 min	} 30 cycles
94°C	30 sec	
52°C	30 sec	
74°C	70 sec	
74°C	7 min	

反応終了後に反応液を0.8%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを検出したコロニーをクローンとした。

2-1-6 プラスミド抽出

2-1-5で得られたクローンを100 mg/Lアンピシリンナトリウム含有LB培地に接種して温度37°C、振とう速度200 rpmで16時間培養した。培養液3 mLを遠心分離操作 (13,000×g, 5 min) により菌体を回収して、プラスミド抽出キットHigh Pure Plasmid Isolation Kit (ロシュ、スイス) を用いてプラスミドを抽出した。得られたプラスミドは微量分光光度計NanoDrop ND-100RPにてDNA収量を測定した。得られたプラスミドを1.0%アガロースゲル電気泳動に供してプラスミドを確認した。

2-1-7 シーケンスおよび相同性探索

プラスミドの塩基配列を決定するために、ジーンネット(株) (日本) にシーケンス解析を依頼した。得られた配列は、データベース (BLAST program of the National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>) で相同性検索を行った。

2-2 ビブリオ・パルニフィカス感染性バクテリオファージの分離

2-2-1 分離源

有明海の2地点の干潟 (428鋼管、六角川自動観測塔) から平成18年10月に海水を採取して分離源に用いた。遠心分離操作 (400×g, 60 min, 4°C) により回収した海水の上清をメンブレンフィルター (孔径; 0.20 μm、材質; セルロースアセテート) (アドバンテック東洋、日本) に供したものをファージ液として用いた。

2-2-2 プラーク試験

指示菌には*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^Tを用いた。表2-7に示す改変ZoBell培地で温度30°C、振とう速度200 rpmでOD₆₆₀=0.3まで培養してプラーク試験に用いた。表2-7の組成の0.5%寒天を含むZoBell軟寒天培地に*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^Tの培養液を接種し、2-2-1に調製したファージ液を加えた後に1.5%寒天を含むZoBell寒天プレートに重層して30°Cで1晩培養した。溶菌斑 (プラーク) 形成の観察によりバクテリオファージを検出した。

表2-7 改変ZoBell培地組成

(軟寒天培地、プレートを含む)

Reagent	
Peptone	5 g
Yeast extract	1 g
寒天末	0 (液体培地) 5 g (軟寒天) 15 g (プレート)
海水	1 L

2-2-3 宿主特異性試験

Vibrio vulnificus NBRC 15645^FをOD₆₆₀=0.3まで培養して2-2-2で検出したバクテリオファージのプラークを1白金耳接種して温度30°C、振とう速度200 rpmで1晩培養した。遠心分離操作(400×g, 60 min, 4°C)により回収した培養液の上清をメンブレンフィルター (孔径: 0.20 μm、材質: セルロースアセテート) に供したものをファージ分離液とした。指示菌には佐賀大学医学部附属病院より供与されたビブリオ・バルニフィカス感染症患者由来の2株 (F株、K株) を用いた。2-2-2と同様の操作でプラーク試験を行い、分離したバクテリオファージの宿主特異性を検討した。

3. 実験結果

3-1 16S rDNAシーケンスによる有明海干潟泥中の細菌相解析

平成18年4月～平成18年12月までの有明海の4地点の干潟泥 (芦刈干潟 (以下アシカリ)、早津江川自動観測塔 (以下タカツ)、428鋼管 (以下428)、六角川自動観測塔 (以下ロッカク)) からDNA抽出、PCR、クローニング、プラスミド抽出を行い、完全16S rDNAのクローンをそれぞれ172クローン、140クローン、137クローン、130クローンを得た。各干潟泥につき10-20クローンずつシーケンス解析を行い、BLASTによって相同性検索を行った。干潟泥中の各細菌相の結果をそれぞれ表3-1～表3-4に示す。

3-1-1 アシカリの干潟泥中の細菌相解析

アシカリでシーケンス解析された全172クローンの中では、分離されている細菌と相同性を示すクローンは16.3%であり、未分離の (Uncultured) 細菌と相同性を示すクローンは83.7%であった。一方、属 (Genus) や種 (Species) レベルで相同性を示すクローンは27.3%であり、門 (Phylum)、綱 (Class)、目 (Order) レベルでのみ相同性を示すクローンは72.7%であった。属レベル以上で相同性を示すクローンの中では、未分離の*Pseudomonas*と未分離の*Verrucomicrobia*と相同性を示すクローンが多く得られた。また、硫黄循環に関わる細菌と推定される未分離のGreen sulfur bacterium、*Desulfobacterales*および*Desulfobulbus*と相同性を示すクローンが得られた。

表3-1 アシカリにおける細菌相 (平成18年4月～12月)

Phylogenetic affiliation	Rank	Total
<i>Betaproteobacterium</i>	Class	1
<i>Gammaproteobacterium</i>	Class	1
Denitrifying bacterium	–	1
Marine bacterium MBIC1357	–	3
Sulfur-oxidizing bacterium OAI2	–	1
<i>Altererythrobacter epoxidivorans</i>	Species	2
<i>Antarctobacter heliothermus</i>	Species	1
<i>Bosea</i> sp.	Genus	1
<i>Cytophaga</i> sp.	Genus	1
<i>Erythrobacter</i> sp.	Genus	1
<i>Flavobacteriaceae</i> bacterium	Family	2
<i>Haslea salstonica</i>	Species	1
<i>Hydrogenophaga defluvii</i>	Species	1
<i>Holophaga</i> sp.	Genus	3
<i>Lentisphaera araneosa</i>	Species	1
<i>Paracoccus alcaliphilus</i>	Species	1
<i>Rhizobium</i> sp.	Genus	1
<i>Thalassiosira eccentrica</i> chloroplast	Species	2
<i>Thiobacillus prosperus</i>	Species	1
<i>Thiohalomonas nitratireducens</i>	Species	1
<i>Variovorax koreensis</i>	Species	1
Uncultured bacterium	–	34
Uncultured <i>alphaproteobacterium</i>	Class	4
Uncultured <i>betaproteobacterium</i>	Class	4
Uncultured <i>gammaproteobacterium</i>	Class	30
Uncultured <i>deltaproteobacterium</i>	Class	9
Uncultured gold mine bacterium D52	–	1
Uncultured green sulfur bacterium	–	1
Uncultured marine bacterium	–	3
Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium	Order	7
Uncultured <i>actinobacterium</i>	Class	5
Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium	Species	4
Uncultured <i>Beijerinckiaceae</i> bacterium	Family	2
Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium	Order	10
Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium	Phylum	3
Uncultured <i>Desulfobacterales</i> bacterium	Order	1
Uncultured <i>Desulfobulbus</i> sp.	Genus	1
Uncultured <i>Ectothiorhodospiraceae</i>	Family	1
Uncultured <i>Firmicutes</i> bacterium	Phylum	1
Uncultured <i>Maricaulis</i> sp.	Genus	1
Uncultured <i>Planctomycete</i>	Species	4
Uncultured <i>Pseudomonas</i> sp.	Genus	6
Uncultured <i>Rhodothermus</i> sp.	Genus	3
Uncultured <i>Saprospiraceae</i> bacterium	Species	1
Uncultured <i>spirochete</i>	Species	1
Uncultured <i>Thioalkalivibrio</i> sp.	Genus	1
Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium	Species	6
Total		172

3-1-2 タカツの干潟泥中の細菌相解析

タカツでシーケンス解析された全140クローンの中では、分離されている細菌と相同性を示すクローンは8.6%であり、未分離の細菌と相同性を示すクローンは91.4%であった。一方、属や種レベルで相同性を示すクローンは24.3%であり、門、綱、目レベルでのみ相同性を示すクローンは75.7%であった。属レベル以上で相同性を示すクローンの中では、未分離の *Bacteroidetes*、*Planctomycete*、*Pseudomonas* と相同性を示すクローンが多く得られた。また、硫黄循環に関わる細菌と推定される分離されている Sulfate-reducing bacterium、*Olavius algarvensis* sulfate-reducing endosymbiont や未分離の green sulfur bacterium、*Desulfobacterales* および *Desulfobulbus* と相同性を示すクローンが得られた。

表3-2 タカツにおける細菌相（平成18年4月～12月）

Phylogenetic affiliation	Rank	Total
<i>Gammaproteobacterium</i>	Class	2
Endosymbiont of unidentified bacterium	–	1
Myxobacterium SMP-2	Species	1
Sulfate-reducing bacterium	–	1
<i>Bizionia saleffrena</i>	Species	1
<i>Skeletonema pseudocostatum</i>	Species	1
<i>Thalassiosira eccentrica</i> chloroplast	Species	1
<i>Caldothrix abyssii</i>	Species	1
<i>Rhodobacteraceae</i> bacterium	Family	1
<i>Olavius algarvensis</i> sulfate-reducing endosymbiont	Species	1
<i>Mesorhizobium</i> sp.	Genus	1
Uncultured bacterium	–	29
Uncultured <i>alphaproteobacterium</i>	Class	3
Uncultured <i>gammaproteobacterium</i>	Class	22
Uncultured <i>deltaproteobacterium</i>	Class	24
Uncultured green sulfur bacterium	–	1
Uncultured green non-sulfur bacterium	–	1
Uncultured actinobacterium	Species	3
Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium	Order	3
Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium	Species	8
Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium	Phylum	5
Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium	Order	5
Uncultured <i>Cyanobacterium</i>	Genus	1
Uncultured <i>Deferribacteres</i> bacterium	Class	2
Uncultured <i>Desulfobacterales</i> bacterium	Order	4
Uncultured <i>Desulfobulbus</i> sp.	Genus	2
Uncultured <i>Flavobacteriaceae</i> bacterium	Species	1
Uncultured <i>Flexibacteraceae</i> bacterium	Family	1
Uncultured <i>Planctomycete</i>	Species	5
Uncultured <i>Pseudomonas</i> sp.	Genus	5
Uncultured <i>Sphingobacteria</i> bacterium	Class	1

Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium	Species	2
Total		140

3-1-3 428の干潟泥中の細菌相解析

428でシーケンス解析された全137クローンの中では、分離されている細菌と相同性を示すクローンは11.7%であり、未分離の細菌と相同性を示すクローンは88.3%であった。一方、属や種レベルで相同性を示すクローンは18.2%であり、門、綱、目レベルでのみ相同性を示すクローンは81.8%であった。属レベル以上で相同性を示すクローンの中では、未分離の *Bacteroidete* と相同性を示すクローンが多く得られた。また、硫黄循環に関わる細菌と推定される分離された Sulfur-oxidizing bacterium、*Desulfobacter* や未分離の *Desulfobacterales* および *Desulfobulbus* と相同性を示すクローンが得られた。

表3-3 428における細菌相（平成18年4月～12月）

Phylogenetic affiliation	Rank	Total
Sulfur-oxidizing bacterium	–	4
Vestimentiferan endosymbiont 'Shinkai #6500'	Species	1
Unidentified bacterium	–	3
<i>Bacteriovorax</i> sp.	Genus	1
<i>Bdellovibrio</i> sp.	Genus	1
<i>Bizionia myxarmorum</i>	Species	1
<i>Cytophaga</i> sp.	Genus	1
<i>Desulfobacter</i> sp.	Genus	1
<i>Propionigenium maris</i>	Species	1
<i>Thiobacillus prosperus</i>	Species	2
Uncultured bacterium	–	22
Uncultured <i>alphaproteobacterium</i>	Class	4
Uncultured <i>gammaproteobacterium</i>	Class	33
Uncultured <i>deltaproteobacterium</i>	Class	22
Uncultured archaeon	Species	1
Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium	Order	3
Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium	Species	4
Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium	Order	8
Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium	Phylum	6
Uncultured <i>Deferribacteres</i> bacterium	Class	2
Uncultured <i>Desulfobacterales</i> bacterium	Order	3
Uncultured <i>Desulfobulbus</i> sp.	Genus	3
Uncultured <i>Ectothiorhodospiraceae</i>	Family	1
Uncultured <i>Holophaga</i> sp.	Genus	2
Uncultured <i>Nitrospirales</i> bacterium	Order	1
Uncultured <i>Pseudomonas</i> sp.	Genus	3
Uncultured <i>Planctomycete</i>	Species	2
Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium	Species	1
Total		137

3-1-4 ロッカクの干潟泥中の細菌相解析

ロッカクでシーケンス解析された全130クローンの中では、分離されている細菌と相同性を示すクローンは13.1%であり、未分離の細菌と相同性を示すクローンは86.9%であった。一方、属や種レベルで相同性を示すクローンは21.5%であり、門、綱、目レベルでのみ相同性を示すクローンは78.5%であった。属レベル以上で相同性を示すクローンの中では、分離されている *Thalassiosira eccentrica*、未分離の *Planctomycete* と相同性を示すクローンが多く得られた。また、硫黄循環に関わる細菌と推定される分離された *endosymbiont of Ridgeia piscesae* (sulfur-oxidizing symbionts)、Sulfate-reducing bacterium、*Olavius algarvensis* sulfate-reducing *endosymbiont* や未分離の *Desulfobacterales* と相同性を示すクローンが得られた。

表3-4 ロッカクにおける細菌相 (平成18年4月～12月)

Phylogenetic affiliation	Rank	Total
Bacteroidetes bacterium	Species	1
<i>endosymbiont of Ridgeia piscesae</i> (sulfur-oxidizing symbionts)	Species	1
<i>Lucina floridana gill symbiont</i>	Species	1
<i>Ophiactis balli symbiont</i> (alphaproteobacterium)	Species	1
Sulfate-reducing bacterium	–	3
Unidentified bacterium	–	1
<hr/>		
<i>Desulfonema magnum</i>	Species	1
<i>Olavius algarvensis</i> sulfate-reducing <i>endosymbiont</i>	Species	1
<i>Planctomyces</i> sp.	Genus	1
<i>Thalassiosira eccentrica</i> chloroplast	Species	6
<hr/>		
Uncultured bacterium	–	22
Uncultured <i>alphaproteobacterium</i>	Class	3
Uncultured <i>gammaproteobacterium</i>	Class	31
Uncultured <i>deltaproteobacterium</i>	Class	15
Uncultured Marine bacterium	–	2
<hr/>		
Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium	Order	2
Uncultured <i>Acinetobacter</i> sp.	Genus	1
Uncultured <i>actinobacterium</i>	Class	3
Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium	Species	3
Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium	Order	6
Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium	Phylum	7
Uncultured <i>Desulfobacterales</i> bacterium	Order	3
Uncultured <i>Firmicutes</i> bacterium	Phylum	1
Uncultured <i>Gelidibacter</i> sp.	Genus	2
Uncultured <i>Oceanospirillales</i> bacterium	Order	1
Uncultured <i>Planctomycete</i>	Species	4
Uncultured <i>Pseudomonas</i> sp.	Genus	3
Uncultured <i>Sphingobacteria</i> bacterium	Class	2
Uncultured <i>Thermus</i> sp.	Genus	1

Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium	Species	1
Total		130

3-2 ビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリオファージの分離

3-2-1 有明海の海水からのバクテリオファージの分離

平成18年10月に採取した有明海の2地点の干潟 (428、ロッカク) の海水を分離源として用い、*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^T を指示菌としてバクテリオファージの分離を行った。その結果、各サンプルから2個ずつプラーク形成が認められた。そこで、*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^T をOD₆₆₀=0.3まで培養してそれぞれのプラークを1白金耳接種して1晩培養したものをファージ分離液としてプラーク試験を行った。その結果、図3-1 (次頁) に示すようにそれぞれのファージ分離液から多数のプラーク形成が認められた。よって、*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^T に感染性を示す4種類のバクテリオファージ (No.1-No.4) の分離に成功した。

3-2-2 分離バクテリオファージの宿主特異性

3-2-1で分離した4種類のバクテリオファージ (No.1-No.4) のファージ分離液を用いてビブリオ・バルニフィカス感染症患者由来の2株 (F株、K株) を指示菌として宿主特異性を検討した。その結果、いずれのバクテリオファージも *Vibrio vulnificus* NBRC 15645^T にのみ感染した (表3-5) ことから、高い宿主特異性を有することが明らかとなった。

表3-5 分離バクテリオファージの宿主特異性

Indicator strain	No.1	No.2	No.3	No.4
<i>V. vulnificus</i> NBRC 15645 ^T	+	+	+	+
<i>V. vulnificus</i> K株	–	–	–	–
<i>V. vulnificus</i> F株	–	–	–	–

+: 感染性

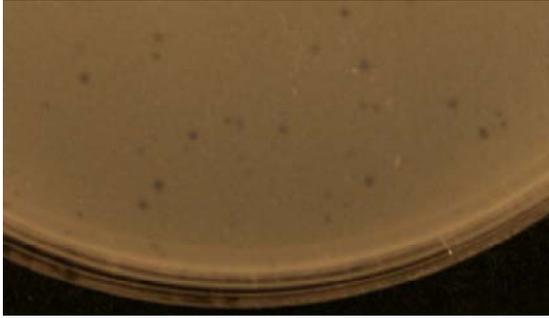
–: 非感染性

4. 結論

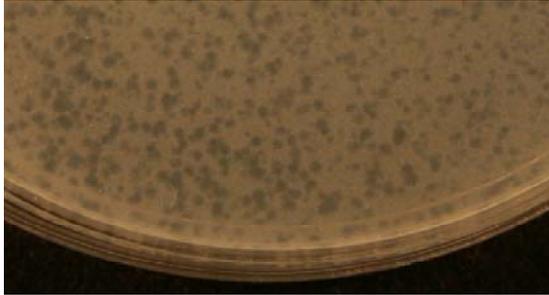
4-1 16S rDNAシーケンスによる有明海干潟泥中の細菌相解析

16S rDNAシーケンス解析により、有明海の4地点の干

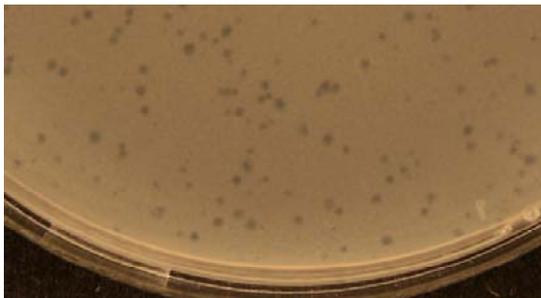
No.1



No. 2



No. 3



No. 4

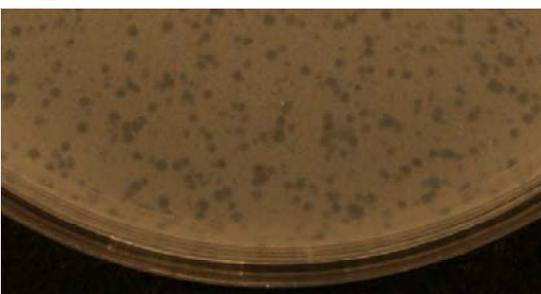


図3-1 *Vibrio vulnificus* NBRC 15645^Tを指示菌とした寒天平板上に認められたプラーク

潟泥（アシカリ、タカツ、428、ロッカク）に存在する合計579種類の細菌が明らかとなった。それぞれの地点の細菌相は異なっていたことから場所の違いによる有明海干潟泥中の細菌相の多様性が示された。また結果には示していないが、同じ地点の細菌相は時期によって異なっていたことから細菌相が経時的に変化することが示された。しかし、いずれの地点においても83.7–91.4%の細菌が未分離の細菌と相同性を示したことから、有明海の干

潟泥中には未知な細菌が多く存在することが明らかとなった。すなわち、有明海干潟泥を分離源とした新規な有用細菌の分離が今後期待される。また、有明海では培養法によりスミノリ症細菌である*Gelidibacter*属細菌や*Flabobacter*属細菌が分離されている⁷⁾。本研究では分子生物学的手法においても同様にタカツとロッカクからスミノリ症細菌の存在が明らかとなった。一方、有明海では脱窒量と脱窒菌による関連が明らかとなっている⁸⁾。本研究では、いずれの地点においてもほぼ毎月硫酸化細菌や硫酸還元細菌が存在することが明らかとなった。よって、それらの細菌が有明海干潟泥における硫黄循環に寄与していることが示唆された。今後、リアルタイムPCRによりそれらの細菌の定量と硫黄循環に関与する酵素の発現量調べ、細菌と硫黄循環の関連を明らかにしていく予定である。

本研究では、16S rDNAシーケンス解析による定性的な細菌相解析を行った。しかし、本手法はシーケンス解析に供するクローンの数により得られる細菌種が限定されることから、網羅的な細菌相解析には不利である。そこで、今後変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法（Denaturing Gradient Gel Electrophoresis; DGGE）による網羅的な細菌相解析を行う予定である。DGGE法による細菌相と今回行った16S rDNAシーケンス解析による細菌相を比較して有明海干潟泥中の優占細菌種を決定する。また、リアルタイムPCRにより優占細菌種を定量的に解析する予定である。

4-2 ビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリオファージの分離

本研究では、有明海海水を分離源として428とロッカクからそれぞれ2種類の合計4種類のバクテリオファージを分離した。分離源が異なることから分離したバクテリオファージは最低2種類であることが示唆された。今後、バクテリオファージからDNA（またはRNA）を抽出してシーケンス解析に供してバクテリオファージの同定を行う予定である。また、動物（ラットやマウス）にビブリオ・バルニフィカス感染症を発症した動物モデルを作製し、分離したバクテリオファージに投与によるファージセラピーの開発を行う。

本研究で分離したいずれのバクテリオファージも*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^Tにのみ感染する高い宿主特異性を示した。ファージセラピーの応用を考慮した場合、様々なビブリオ・バルニフィカス株に感染するすなわち宿主特異性の低いバクテリオファージの分離が必要である。そこで、*Vibrio vulnificus* NBRC 15645^T以外にビブリオ・バルニフィカス感染症患者由来の2株（F株、K株）や有明海より分離されたビブリオ・バルニフィカスを指示菌として引き続き有明海からのバクテリオファージの分離を行う予定である。

謝辞：干潟泥サンプル、海水サンプルをご供与頂いた有明水産振興センター・三根崇幸氏およびビブリオ・バルニフィカスをご供与頂いた佐賀大学医学部中島幹夫先生、有明海総合研究プロジェクト大石浩隆先生、佐賀大学医学部付属病院検査部の方々に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Sorokin, D. Y., Foti, M., Pinkart, H. C., and Muyzer, G.: Sulfur-oxidizing bacteria in Soap Lake (Washington State), a meromictic, haloalkaline lake with an Unprecedented High Sulfide Content, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol 73, pp.451-455, 2007.
- 2) Urakawa, H., Maki, H., Kawabata, S., Fujiwara, T., Ando, H., Kawai, T., Hiwatari, T., Kohata, K., and Watanabe, M.: Abundance and Population Structure of Ammonia-Oxidizing Bacteria That Inhabit Canal Sediments Receiving Effluents from Municipal Wastewater Treatment Plants, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol 72, pp.6845-6850, 2006.
- 3) Hahn, M. W. and Höfle, M. G.: Grazing of protozoa and its effect on populations of aquatic bacteria, *FEMS Microbiol. Ecol.*, Vol.35, pp.113-121, 2001.
- 4) 小林由実：救命し得た *Vibrio vulnificus* 敗血症の1例, 臨床と研究, 第8巻, 第2号, pp.299-302, 2004.
- 5) Stone, R. : Bacteriophage therapy, pioneered in Stalin-era Russia, is attracting renewed attention in the West as a potential weapon against drug-resistant bugs and hard-to-treat infections. *Science*, Vol298, pp.728-731, 2002.
- 6) Penn, K., Wu, D., Eisen, J. A., and Ward, N.: Characterization of Bacterial Communities Associated with Deep-Sea Corals on Gulf of Alaska Seamounts, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol 72, pp.1680-1683, 2007.
- 7) 神田康三：有明干潟の微生物環境 有明干潟生息細菌叢の変動に関する生物学的要因の探索, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第2巻, pp. 107-110, 2006.
- 8) 瀬口昌洋, 郡山益実, 石谷哲寛, 古賀あかね：有明海奥部における干潟域の脱窒と西岸域の貧酸素水塊の発生について, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第2巻, pp. 47-54, 2006.

(2007. 3. 19受付)

有明海におけるスミノリ病原細菌の経年変換

SECULAR CHANGE OF *SUMINORI* PATHOGENIC BACTERIA IN ARIAKE SEA

神田康三
Kohzo KANDA

農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Nori cultivation in Ariake sea has been developed as most important industry around the coastal area, especially in Saga prefecture. As the production amount of nori is deeply dependent on the environment factors of Ariake sea, such as **temperature and nutritional condition**, the environmental change in the sea sometimes induces the flush out of various disease. *Suminori* disease caused by the infection of pathogenic bacteria is known to be one of the most serious disease during *nori* cultivation. When 3 stocked strains bacteria which were isolated in 1985, 2002 and 2004, were investigated, Two strains isolated in 2002 and 2004 was identified to be same and belonged to *Flavobacter* sp., however, the isolate in 1985 was identified as *Arthrobacter* sp. Since those two types of bacteria was revealed to case the *Suminori* disease in *nori* tissue, this disease was suggested to be occurred with several types of bacteria. The appearance of different type of *Suminori* pathogen would be introduced by the change of microbial environment in Ariake sea. Between 1985 and 2002, the acid treatment was started to carry out in *nori* cultivation to prevent the suffer with *Suminori* disease. The seasonal change of the *Suminori* pathogenic bacterium was revealed that the pathogen was detected in restricted term of the year.

Key Words : *Suminori* pathogenic bacteria, dynamics of bacterial flora

1. 序論

半閉鎖系海域である有明海において、ノリ養殖産業は日本有数の高い生産性と高品質のため沿岸地域の主要産業となっている。しかしながら、ノリ養殖では自然条件に大きく依存することから、年ごとの生産高には変動があり、その安定供給のためさまざまな工夫がなされている。一般にノリ養殖では、秋季（10月上旬）の採苗に始まる秋芽網期と、秋芽網の冷凍保存したものを冬季になって再度利用する冷凍網期の2段階栽培法が用いられている（図1）。比較的水温の高い時期に栽培する秋芽網では、これを継続してゆくと晩秋期にはアカグサレ病の発生や壺状菌による感染症が多発してノリの生産が大きく低下することから、冷凍網法が考案された。冷凍網法では、秋芽網期間のノリ網の一部を冷凍保存し、水温が下がり微生物活動の鈍った冬季に冷凍出庫してノリ栽培を再開するものであり、冷凍網期のノリは品質がよく高価で取引されるため、現在ではノリ養殖産業の主流となっている。ところが、冷凍網期には往々にして細菌感染によるスミノリ症が大発生し（1985年、1990年、2002

年）、経済的に大きな被害をもたらしてきた（表1）。スミノリ症の発生を防除するため、様々な対策が考案された結果、1993年（平成5年）からはノリ網の有機酸による酸処理が導入された。酸処理開始以後から9年間はスミノリ症の発生が見られず、スミノリ症の防除に成功したかにみえたが、2002年（平成14年）にスミノリ症の大発生が起こり、このことは有明海会的環境保全を含む社会的な大問題にまで発展した。

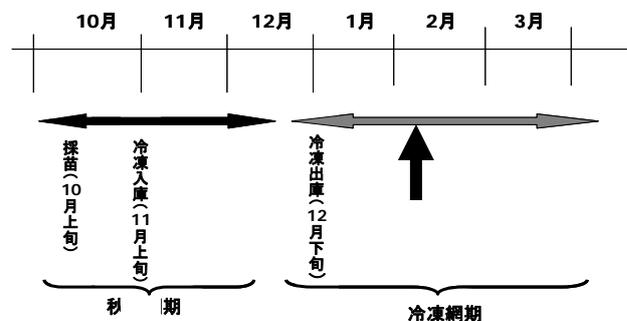


図1. ノリの養殖期間

表1. スミノリ発生状況

年度	被害
1980	—
1981	±
1982	±
1983	—
1984	+
1985	+++
1986	±
1987	—
1988	—
1989	—
1990	+++
1991	+
1992	—
2001	—
2002	+++
2003	—
2004	—

スミノリ症を防除するためにはその発症機序解明研究が重要な役割を果たすが、有明海におけるスミノリ症病原細菌の分離・同定とその細菌叢の消長の解明はその研究の糸口となる。そこで、本研究では佐賀県有明水産振興センターの協力を得て、センター保存のスミノリ症細菌の同定と、それに基づいた六角川河口海水におけるスミノリ症細菌の季節変動を検討した。

2. 実験材料および方法

スミノリ症細菌

スミノリ症細菌は佐賀県有明水産振興センターで昭和60年、平成14年および平成16年に分離保存された菌株を本研究に供試した。

スミノリ症発症実験

500ml フラスコ中のノリ葉体に対し、培養細菌液（1 x 10⁴ CFU/ml）を添加し、15°Cで1週間培養した後、葉体を顕微鏡観察（400倍）することで、細胞の原形質吐出を検討した。

スミノリ症細菌の同定

スミノリ症細菌は感染・発症が確認されたものを同定

実験に供試した。細菌種の同定には培養菌体よりDNAを抽出後、16S rDNA領域をプライマー-F（5' AAGGAGCGMRAC CC3'）およびプライマー-R（5' GACGGGCGGTGTGTRC3'）を用いて¹⁾、PCRで増幅した。次にこの増幅DNA断片の塩基配列を決定後、GenBankデータベースを利用して、細菌種の検索を行った。細菌種の決定はPCR法によって増幅した16S rDNAの塩基配列および細菌の生物学的特性に基づいて行った。

また、細菌の運動性は細菌を0.7%軟寒天中に設置したガラス管内に接種した後、培養後の細菌のガラス管外への拡散増殖を観察することで検討した。

スミノリ症細菌の培養条件

培地はZoBell 2216E 培地（表1）を用いた。培養温度は20°Cで、液体培養では振とう培養を行い、固体培養ではZoBell 2216E培地に終濃度が1.5%となるように寒天を加えた培地を使用した。

表2. Zobel1 2216E 培地組成

Polypepton	0.5%
Yeast Extract	0.1%
海水(N a C l : 0.25%)	
pH 8.0	

海水中およびノリ葉体におけるスミノリ症細菌の検索

海水中のスミノリ症細菌の検索は、六角川河口（図2）の海水を用いて行った。

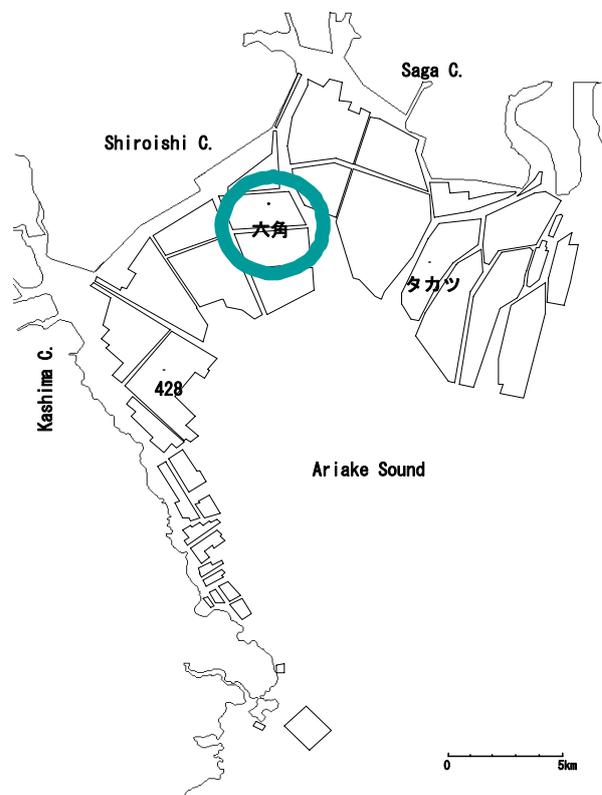


図2. 検体採集場所

海水を採取後、滅菌海水で段階希釈し、Zobel 2216E 寒天培地に塗布して培養した。培養後の細菌からスミノリ症細菌の特徴である卵黄色で光沢のあるコロニー数を計測した。なお、これらの細菌は今回検出されたスミノリ症細菌の菌体抗体を用いて凝集反応で菌種の確認を行った。

3. 実験結果および考察

スミノリ症発症実験

有明水産振興センター保存菌株によるノリ葉体に対するスミノリ症発症実験の結果、平成14年保存菌株と平成

存菌株は共に運動性を有することから、*Flabobacter*属細菌と同定し、本菌を*Flabobacter* sp. H14LY株と呼称した。なお、*Gelidibacter*属細菌は新たな海洋細菌として1997年に南極から *Gelidibacter algensis* が記載されたが²⁾、現在に至るまでに数種の *Gelidibacter*属細菌が分離されているにすぎない^{3,4)}。今回、*Flabobacter*属細菌として同定されたスミノリ症細菌では、種名の決定までには至っておらず、種の決定は現在検討中である。

一方、昭和60年保存菌株は他の2菌株とは異なり、*Arthrobacter*属と高い相同性を示した。この結果はノリ葉体に感染してスミノリ症を発症させる細菌が単一でないことを示唆しており、スミノリ症を引き起こす原因となる細菌が交代しうる可能性を示すものと考察された。

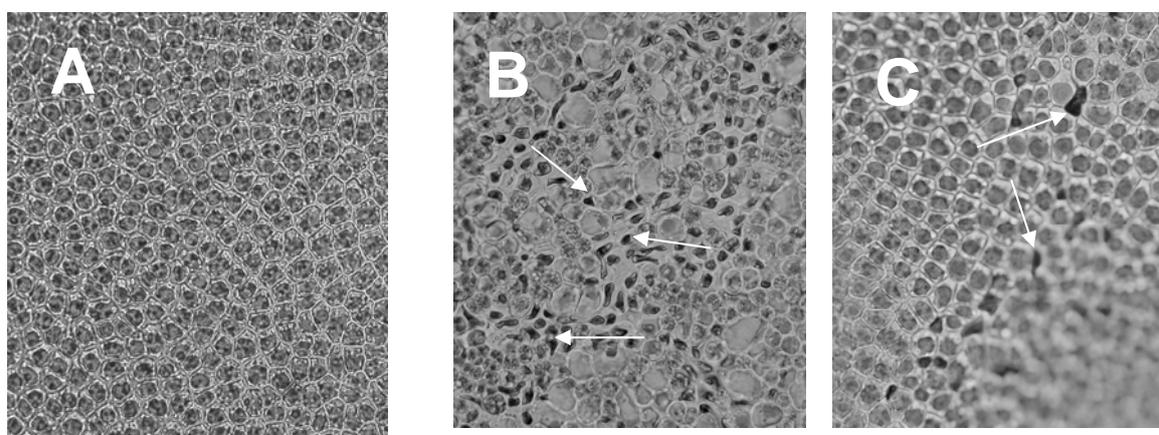


図3. スミノリ症細菌の感染実験

A: 対象区、 B:平成14年保存菌株および平成16年保存菌株感染区、
C: 昭和60年保存菌株感染区 * 矢印は原形質吐出を示す

16年保存菌株では同程度の強い病原性が認められたが、昭和60年保存菌株では病原性は認められるものの、前者2株のような強い病原性は認められなかった(図3)。

スミノリ症細菌種の同定

今回供試した3菌株(昭和60年保存菌株、平成14年保存菌株および平成16年保存菌株)はすべてスミノリ症細菌の生物学的特性である淡黄色のコロニーをZoBel

12216E 固形培地上で形成し、大きさ約1.0x10.0μmのグラム陰性細菌であった。一方、16S rDNAの塩基配列による細菌種の検索では、平成14年保存菌株と平成16年保存菌株では16S rDNAの塩基配列は同一で、*Flabobacter*属および*Gelidibacter*属と高い相同性を示した。これまでの知見から、スミノリ症細菌は従来*Flabobacter*属細菌と推察されてきたが、今回、新たに*Gelidibacter*属細菌の可能性が示唆される結果が得られた。そこで両者の相違点である鞭毛の有無を基準として検討した結果、保

存菌株は共に運動性を有することから、*Flabobacter*属細菌と同定し、本菌を*Flabobacter* sp. H14LY株と呼称した。なお、*Gelidibacter*属細菌は新たな海洋細菌として1997年に南極から *Gelidibacter algensis* が記載されたが²⁾、現在に至るまでに数種の *Gelidibacter*属細菌が分離されているにすぎない^{3,4)}。今回、*Flabobacter*属細菌として同定されたスミノリ症細菌では、種名の決定までには至っておらず、種の決定は現在検討中である。

一方、昭和60年保存菌株は他の2菌株とは異なり、*Arthrobacter*属と高い相同性を示した。この結果はノリ葉体に感染してスミノリ症を発症させる細菌が単一でないことを示唆しており、スミノリ症を引き起こす原因となる細菌が交代しうる可能性を示すものと考察された。

スミノリ症によるノリ被害が大きかった昭和60年から同様規模の発症をみた平成14年にかけて起こったスミノリ症細菌にとって大きな変化として、平成5年に導入された酸処理が挙げられる。スミノリ症を発症させる細菌種の変化には、酸処理による細菌生育環境の変化も推定される。

スミノリ症細菌の季節変動

スミノリ症細菌*Flabobacter* sp. H14LY株の季節変動を検討した結果、年間を通して少数検出されることもあるが、本菌の有明海における出現時期は極めて限定されていることが実証された(図4)。その時期はノリ養殖が開始される秋芽網期ではなく、冷凍網期と一致していることが明らかとなったことから、本菌の増殖にはノリ網の冷凍処理が原因は不明であるが、何らかの影響をおよぼしている可能性が考えられた。

細菌数
($\times 10^4$ /ml)

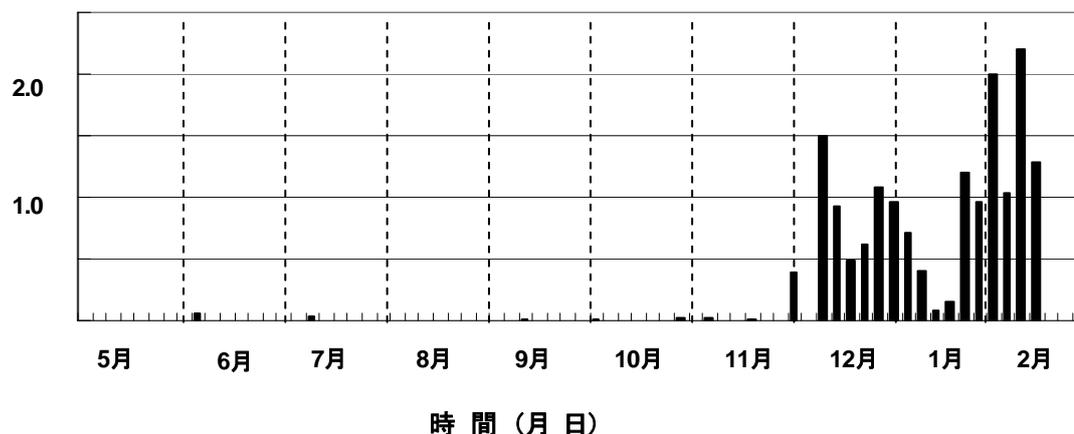


図. 4 スミノリ症細菌の季節変動

結 論

スミノリ症発生でノリ養殖に大被害を引き起こした時期に分離・保存されたスミノリ病原細菌の病原性を検討した結果、昭和60年保存菌株ではノリ感染は見られるものの、感染力は弱いことが判明した。この原因は本菌が本来もつ性状なのか、保存による感染力の低下なのかは現在のところ不明である。興味深いことには、スミノリ症発生による大被害時に分離された昭和60年保存株と平成14年保存株では、スミノリ症発症を引き起こすものの、その属が異なる細菌であることが明らかとなった。このことから、一般に言われるスミノリ症の発症の原因となりうる細菌が複数存在することが推察された。また、昭和60年と平成12年の大被害の間には平成5年から実施されたノリ網の酸処理があることから、酸処理が微生物環境に影響をおよぼし、菌叢の変化を引き起こした可能性も考えられた。一方、スミノリ症細菌数の季節変動の検討結果、年間で少数が認められる場合もあるが、本細菌の海水中に多数出現する時期が極めて限定されていることが明らかとなった。さらに、ノリ養殖が開始される秋芽網期には細菌の出現が認められず、細菌の出現と細菌数の増加が冷凍網期と完全に一致することから、原因は現在不明であるが、ノリ網の冷凍処理がスミノリ症細菌の増殖を助長する可能性が示唆される。

謝辞：スミノリ症細菌の分与および六角川河口の海水の採集を快くお引き受け頂いた、有明水産振興センター・(鹿児島大学連合大学院農学研究科) 三根崇幸氏、佐賀県有明再生課・川村嘉広博士、に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Oyaizu, H. Identification of bacteria and analysis of microflora by 16S rDNA sequences. Business Center for Academic Society of Japan, Tokyo 1992
- 2) Bowman, J.P., McCammon, S.A., Brown, J.L., Nichols, P.D. and McMeekin, T.A., *Psychroserpens burtonensis* gen. nov., sp. nov., and *Gelidibacter algens* gen. nov., psychophilic bacteria isolated from Antarctic lacustric and sea ice habitats, *Int. J. Sys. Bacteriol.*, Vol. 47, pp. 670-677, 1997
- 3) Macian, M.C., Pujalte, M.J., Marquez, M.C., Ludwig, W., Ventosa, A., Garay, E. and Schleifer, K.H.: *Gelidibacter mesophilus* sp. nov., a novel marine bacterium in the family *Flavobacteriaceae*, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, Vol. 52, pp. 1325-1329, 2002
- 4) Brown, J.P. and Nichols, D.S. : Novel members of the family *Flavobacteriaceae* from Antarctic marine habitats including *Subsaximicroblum wynnwiliamsii* gen. nov., sp. nov., *Subsaximicroblum saxingullinus* sp. nov., *Subsaxibacter broadly* gen. nov., sp. nov., *Lacinutrix copepodicola* gen. nov., sp. nov. and novel species of the genera *Bizionia*, *Gelidibacter* and *Gillisia*, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, Vol. 55, pp. 1471-1486, 2005

(2007. 3. 19受付)

ポルフィランの栄養生理機能に関する研究

PHYSIOLOGICAL FUNCTION OF PORPHYRAN ON LIPID METABOLISM IN HEPG2 CELLS

柳田晃良¹、山野尚美²、坂田幸大郎³、井上奈穂⁴、永尾晃治⁵
Teruyoshi YANAGITA, Naomi YAMANO, Kotaro SAKATA,
Nao INOUE and Koji NAGAO

¹農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²佐賀大学農学部応用生物科学科4年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³佐賀大学大学院農学研究科応用生物科学専攻修士2年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴農修 鹿児島大学大学院博士3年 連合農学研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁵農博 佐賀大学助教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

It is known that high levels of apolipoprotein B100 (apoB100) and lipids in the serum are risk factors for atherogenesis. In the present study, we evaluated the effects of porphyran, a sulfur-containing polysaccharide in a marine alga (*Porphyra yezoensis*), on lipid metabolism and apoB100 secretion in human liver model cells, HepG2. Porphyran had no effect on MTT activity compared with the untreated cells. Porphyran, however, decreased apoB100 secretion into the medium from HepG2 cells. The effect was attributable to the suppression of newly synthesis of lipids, such as triglyceride, free cholesterol, and cholesteryl ester, in HepG2 cells. Thus, porphyran may be beneficial to reduce risk factors for atherosclerosis.

Key Words : Porphyran, lipid metabolism, HepG2 cell

1. 序論

近年、ライフスタイルや食生活の大きな変化に伴い、肥満、高血圧、高脂血症などの生活習慣病が増加している。そのなかでも高脂血症は、日本人の主要な死亡原因の一つである動脈硬化性疾患発症の重大な危険因子として知られている。そこで現在、脂質代謝異常を改善し高脂血症を予防・改善する作用を有する機能性成分の検索が盛んに行われている。

我々の研究室ではこれまでに、タマネギに含まれるS-プロピル-L-システイン、シクロアリインなどの含硫化合物が、脂質代謝改善作用を有することを報告してきた(1-4)。本研究では、脂質代謝改善作用を有する含硫化合物の候補として、ノリ特有の水溶性粘質多糖で、分子中に硫酸基を有するポルフィランに着目した。ポルフィランは、D-ガラクトースとL-ガラクトースが反復結合した直鎖の酸性ガラクタンである。L-ガラクトースは6位が硫酸化したものと、3位と6位でアンヒドロ化したもののいずれかであり、D-ガラクトースは一部、6

位の水酸基がメチル化している。6位が硫酸化したL-ガラクトースが存在するため、分子中に硫酸基を多く含有する(図1)。これまでに、ポルフィラン及びその低分子化合物に幾つかの生理活性が報告されているもの(5-8)、脂質代謝に及ぼす影響の詳細は明らかでない。本研究ではポルフィランがヒト肝臓由来HepG2細胞の脂質代謝に及ぼす影響について検討することで、生理作用機序の解明を行った。なおHepG2細胞は、ヒト肝臓実質細胞の多くの生化学的機能と血漿リポタンパク質の合成・分泌における栄養応答性調節機能を保持しており、ヒト肝臓の実験モデルとして広く用いられている。

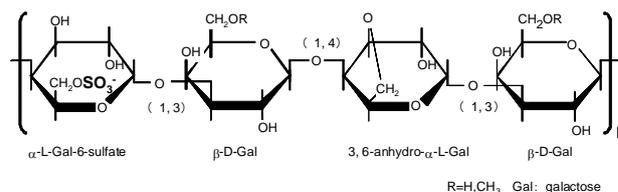


図1 ポルフィランの構造

2. 実験方法

実験にはスサビノリ由来ポルフィランを用いた。HepG2細胞は大日本住友製薬株式会社（大阪）から購入した。HepG2細胞は10% FCS、ペニシリン（100IU/ml）及びストレプトマイシン（100 μ g/ml）を含むDME培地を用いて、37 $^{\circ}$ C、95%空気、5%二酸化炭素の条件下で継代培養した。

実験には、6 well dishにコンフルエントな状態になった細胞を用い、基本培地（1%BSA-DMEM）に交換して24時間前培養した。その後、試験培地で24時間培養し、これらの培地と細胞を回収し、分析に供した。試験培地としては、対照群は1%BSA-DMEMを用い、試験群は200 μ M リノール酸を含む1%BSA-DMEM、及びこれにポルフィランをディッシュあたりそれぞれ10 μ g、100 μ g、500 μ g同時添加した培地を用いた。なお試験培地中のリノール酸は、1%BSA-DMEM中で超音波処理（Sonifier 250, Branson Ultrasonic Co., Danbury, CT, USA）によりリノール酸-BSA複合体を調製して添加した。

回収した細胞は、超音波発生器を用いて細胞ホモジネートを調製し、Lowry法（9）を用いてタンパク質を定量した。培地中のアポリポタンパク質apoB100濃度の測定は、Total Human ApolipoproteinB（ApoB）ELISA Assay（ALerCHEK, inc., Maine, USA）を用いたサンドイッチELISA法（10）により測定した。

ポルフィランがHepG2細胞における新規脂質合成に及ぼす影響については、上記と同様に前培養後、脂質前駆体である放射性標識 $[^{14}\text{C}]$ 酢酸を18.5kBq同時添加した試験培地に交換して24時間培養し、回収した細胞を分析に供した。放射性酢酸の新規合成脂質への取り込みは、Yotsumotoらの報告に準じて行った（11）。即ち、回収した細胞中の脂質を、Bligh and Dyer法（12）に従い抽出濃縮し、薄層クロマトグラフィー（thin layer chromatography, TLC）法（13, 14）により分画した。TLCには市販のシリカゲル70プレート（和光純薬）を用い、展開溶媒として石油エーテル：ジエチルエーテル：酢酸（82：18：1, v/v/v）を用いた。展開終了後、バイオイメージングアナライザ（BAS1000, 富士写真フイルム, 神奈川）を用いて放射能活性を測定した。

ポルフィランの細胞毒性試験は、MTT法（15）により評価した。

得られたデータの統計解析は、Duncan's multiple range test（16）を用いて多重比較検定を行った。

3. 実験結果

まず最初に、ポルフィランがHepG2細胞に及ぼす細胞毒性についてMTT法により測定した。

その結果、10–500 μ g/mlの濃度では、対照群と比べ

て有意な影響を与えなかったことから、本実験で用いた濃度でポルフィランは、HepG2細胞の増殖に悪影響を及ぼさないことが示された（図2）。

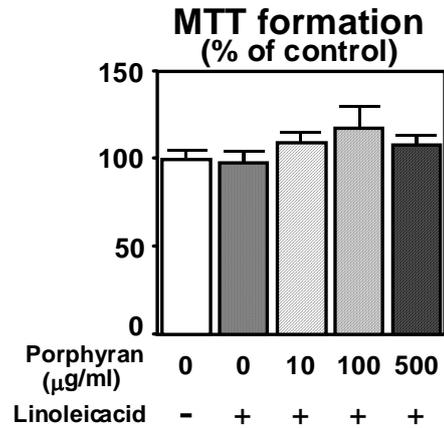


図2 ポルフィランのHepG2細胞に対する細胞毒性試験

次に、ポルフィランがHepG2細胞から培地へのApoB100分泌に及ぼす影響について調べるために、サンドイッチELISA法により培地中ApoB100濃度を測定した。

その結果、ポルフィランを500 μ g/ml添加した群で有意な低下が認められたことから、ポルフィランはリポ蛋白質分泌抑制作用を持つことが示唆された。（図3）。

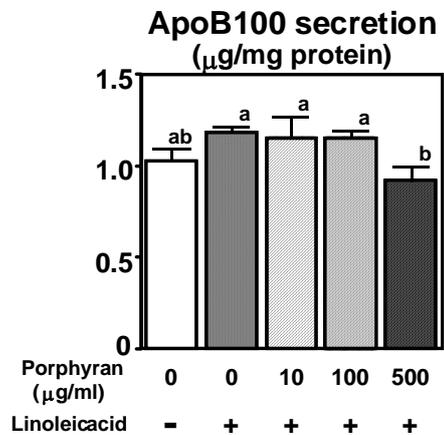


図3 ポルフィランがApoB100分泌に及ぼす影響

abc $P < 0.05$ で有意差有り

ポルフィランにリポ蛋白質分泌抑制作用が示唆されたことから、その作用機序の解明を行った。即ち、細胞内新規脂質合成に及ぼすポルフィランの影響について、放射性標識脂質前駆体 $[^{14}\text{C}]$ 酢酸を用いて解析を行った。

その結果、ポルフィラン添加した群において、トリグリセリド合成の有意な低下が認められた（図4）。

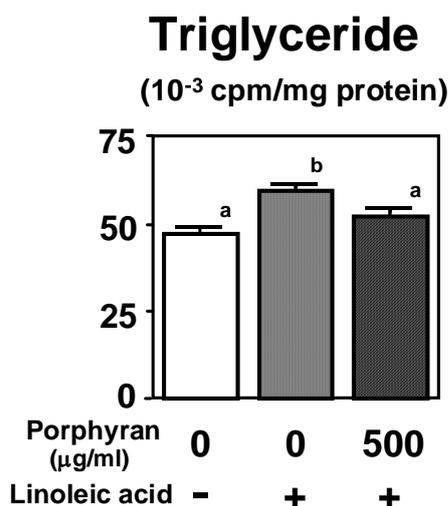


図4 ポルフィランが細胞内新規トリグリセリド合成に及ぼす影響
abc $P < 0.05$ で有意差有り

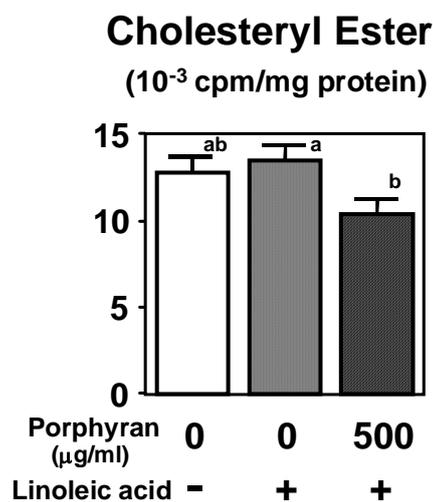


図6 ポルフィランが細胞内新規コレステロールエステル合成に及ぼす影響 abc $P < 0.05$ で有意差有り

また、肝臓におけるリポ蛋白質合成において主要な構成成分として重要である遊離型コレステロールおよびエステル型コレステロールの細胞内合成においても、ポルフィランを添加した群で有意な低下が認められた (図5、図6)。

従って、ポルフィランによるHepG2細胞からのApoB100分泌低下は、肝臓における新規脂質合成の抑制によることが示唆された。

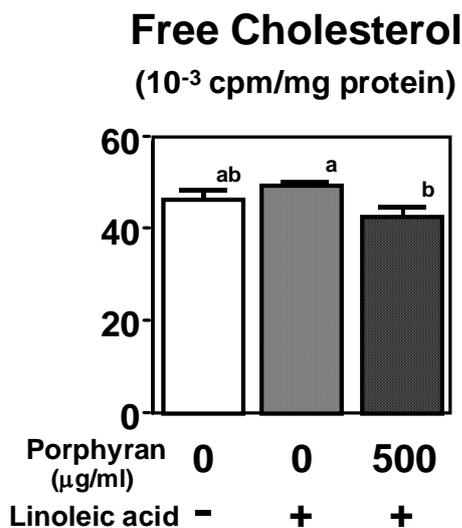


図5 ポルフィランが細胞内新規遊離コレステロール合成に及ぼす影響 abc $P < 0.05$ で有意差有り

4. 結論

以上の結果から、ポルフィラン質は、脂質代謝改善作用を示し、生活習慣病の予防に利用し得る可能性が示唆された。

謝辞：スサビノリ由来ポルフィランをご供与頂いた佐賀大学農学部生命機能科学科食糧安全学分野・濱洋一郎助教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 柳田晃良, 韓瑞瑛, 阿武尚彦: タマネギ成分のニュートラスティカルな作用, *バイオサイエンスとインダストリー*, 58, 855-858, 2000.
- 2) Han, S.Y., Anno, T., and Yanagita, T.: S-Propyl cysteine reduces apolipoprotein B100 and triacylglycerol secretion in HepG2 cells., *Nutrition*, Vol.18, pp.505-509, 2002.
- 3) Han, S.Y., Anno, T., Fukuda, N., Nagao, K. and Yanagita, T.: S-Propyl-cystein sulfoxide and DL-methionine sulfoxide inhibit the secretion of apolipoprotein B100 secretion and lipids in HepG2 cells., *J. Oleo Sci.*, Vol.51, pp.243-250, 2002.
- 4) Yanagita, T., Han, S.Y., Wang, Y.M., Tsuruta, Y. and Anno, T.: Cycloallin, A cyclic sulfur imino acid, reduces serum triacylglycerol in rats., *Nutrition*, Vol.19, pp.140-143, 2003.
- 5) Yoshizawa, Y., Ametani, A., Tsunehiro, J., Nomura, K., Itoh, M., Fukui, F. and Kaminogawa, S.: Activation of murine

- macrophages by polysaccharide fractions from marine algae (*porphyra yezoensis*), *Bioci Bioyech Biochem.*, Vol.57, pp.1862-1866, 1993.
- 6) Ren, D., Noda, H., Amano, H., Nishino, T. and Nishizawa, K.: Study on antihypertensive and antihyperlipidemic effects of marine algae., *Fisheries Sci.*, Vol.60, pp.83-88, 1994.
 - 7) Yoshizawa, Y., Ametani, A., Tsunehiro, J., Nomura, K., Itoh, M., Fukui, F. and Kaminogawa, S.: Macrophage stimulation activity of the polysaccharide fraction from a marine alga (*porphyra yezoensis*): Structure-function relationships and improved solubility., *Bioci Bioyech Biochem.*, Vol.59, pp.1933-1937, 1995.
 - 8) Tsuge, K., Okabe, M., Yoshimura, T., Sumi, T., Tachibana, H. and Yamada, K.: Dietary effect of porphyran from *porphyra yezoensis* on growth and lipid metabolism of Sprague-Dawley rats., *Food Sci. Technol. Res.*, Vol.10, pp.147-151, 2004.
 - 9) Folch, J., Lees, M. and Sloane-Stanley, G.H.: A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues., *J. Biol. Chem.*, Vol.226, pp.497-506, 1957.
 - 10) Young, S.G., Smith, R.S., Hogle, D.M., Curtiss, L.K. and Witztum, J.L.: Two new monoclonal antibody-based enzyme-linked assays of apolipoprotein B., *Clin Chem.*, Vol.32, pp.1484-1490, 1986.
 - 11) Yotsumoto, H., Yanagita, T., Yamamoto, K., Ogawa, Y., Cha, J.Y. and Mori, Y.: Inhibitory effects of oren-gedoku-to and its components on cholesteryl ester synthesis in cultured human hepatocyte HepG2 cells: evidence from the cultured HepG2 cells and in vitro assay of ACAT., *Planta Med.*, Vol.63, pp.141-145, 1997.
 - 12) Bligh, E.G. and Dyer, W.J.: A rapid method of total lipid extraction and purification., *Can J Biochem Physiol.*, Vol.37, pp.911-917, 1959.
 - 13) Yanagita, T., Satoh, M., Enomoto, N. and Sugano, M., Di(2-ethylhexyl)phthalate enhances hepatic phospholipids synthesis in rats., *Biochim Biophys Acta*, Vol.919, pp.64-70, 1987.
 - 14) Cha, J.Y., Mameda, Y., Yamamoto, K., Oogami, K. and Yanagita, T.: Association between hepatic triacylglycerol accumulation induced by administering orotic acid and enhanced phosphatidate phosphohydrolase activity in rats., *Biosci Biotechnol Biochem.*, Vol.62, pp.08-13, 1998.
 - 15) Sladowski, D., Steer, S.J., Clothier, R.H. and Balls, M.: An improved MTT assay., *J Immunol Methods*, Vol.157, pp.203-207, 1993.
 - 16) Duncan, D.B.: Multiple range and multiple F tests., *Biometrics*, Vol.11, pp.1-42, 1955.

(2007. 5. 31受付)

高度活性化物質探索を目的とした プライミング好中球の調製

PREPARATION OF PRIMING NEUTROPHILS BY TRANSMEMBRANE
PEPTIDES DERIVED FROM FMLP RECEPTOR

杉山大輔¹、林 良²、柴田大介³、長田聡史⁴、藤田一郎⁵、
浜崎雄平⁶、兒玉浩明⁷

Daisuke SUGIYAMA, Ryo HAYASHI, Daisuke SHIBATA, Satoshi OSADA, Ichiro FUJITA,
Yuhei HAMASAKI, and Hiroaki KODAMA

¹理修 佐賀大学大学院 工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²理博 佐賀大学 博士研究員 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
Present Address, Laboratory of Cell Biology, National Cancer Institute,
National Institutes of Health, Bethesda, MD 20859, U.S.A.

³佐賀大学大学院 工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴理博 佐賀大学助手 理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁵医博 佐賀大学助教授 医学部小児科学講座 (〒849-8502 佐賀市鍋島町)

⁶医博 佐賀大学教授 医学部小児科学講座 (〒849-8502 佐賀市鍋島町)

⁷理博 佐賀大学助教授 理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Formyl peptide receptor mediates a number of important host defense functions. Recently, peptides derived from the transmembrane domains of GPCRs were shown to disrupt dimer formation by receptors and to result in specific regulation of receptor function. To the preparation of primed neutrophils, peptides derived from formyl peptide receptor were synthesized by solid phase peptide synthesis and their biological activities were evaluated with human neutrophils. Neutrophils treated with synthetic peptides produced 4-fold superoxide anion compared with untreated cells. The result suggests that the transmembrane sequences of formyl peptide receptor have a function related to a priming effect.

Key Words : *fMLP, formyl peptide receptor, human neutrophil, priming, superoxide production*

1. 前置

ヒトをはじめとする多細胞生物が恒常性を維持する上で、細胞外及び細胞間の情報の伝達は重要である。生体ではこれら情報の伝達に例えばホルモンなどの化学物質を用いる。化学物質による情報伝達システムの簡単な理解はリガンドとしての化学物質と細胞膜上に存在する受容体との結合である。事実、リガンドが受容体に結合することで細胞内のタンパク質が活性化され最終的な生物応答が引き起される。

細胞膜上に存在する受容体の中で細胞膜を7回貫通する構造のものが最も多い。この種類の受容体は細胞質側でGタンパク質と共役しているためG protein-coupled

receptor (GPCR)と呼ばれている。近年の遺伝子解析の結果は数百種類のGPCRが未同定として存在することを示唆している。初期の受容体研究において、リガンドと受容体の結合様式は非常に単純で単量体の受容体に1つのリガンドが結合するという1:1の理解であった。現在ではリガンドに対する結合親和性やリガンド結合後の情報伝達の違いなど、受容体が性質の異なる複数の状態で細胞膜上に存在していることが明らかにされつつある。また近年の生物学的研究手法の発達により、それら受容体の細胞膜上での会合体形成を示唆する実験的事実も得られ始めている。しかしながら、受容体の性質と会合体形成の関係、さらには会合体へのリガンド結合により引き起される生物応答との関係については解明されていない。GPCRの中で細菌の代謝産物由来のペプチドfMLP (HCO-

表 - 1 各膜貫通ペプチドの配列

Sequences	Peptides
SKSKSKIITYLVFAVTFVLGVLGNGLVIWVA -NH ₂	hFPRTM1
Ac- WTISYLNLA VADFS FTSTLPPFFSKSKSK -NH ₂	hFPRTM2
SKSKSKFLFTIVDINLFGSVFLIALIALDW -NH ₂	hFPRTM3
Ac-SLAKKVIIGPW MALLLTLPVIIRSKSKSK -NH ₂	hFPRTM4
SKSKSKRFIIGFSAPMSIVAVSYGLIATKW -NH ₂	hFPRTM5
Ac-VLSFVAA FFLSWSPYQVVALIATVRSKSKSK -NH ₂	hFPRTM6
SKSKSKVTSALAFFNSSLNPM LYVFMGQW-NH ₂	hFPRTM7

Met-Leu-Phe-OH) が結合するホルミルペプチド受容体がある。ホルミルペプチド受容体は免疫応答を担う白血球の主要成分である好中球に発現している。ホルミルペプチド受容体にリガンドが結合すると細菌感染部位への遊走、貪食や活性酸素の放出などの免疫応答を誘導する。

タンパク質は100残基以上のアミノ酸が連結した分子量の大きな化合物である。タンパク質の活性と構造には密接な関係がある。タンパク質の構造は特定の構造ドメインが折り畳まれた状態で形成される。その様な構造は水素結合や疎水性相互作用など複数の化学的相互作用により形成されている。近年、細菌の細胞膜上の存在する酵素がその酵素の膜貫通ドメインに由来するペプチドで酵素の会合体形成を調節し、酵素活性を制御することが報告された。

有用天然物検索の新しい評価法として、ヒト好中球の高度活性化を検討した。ヒト好中球を高度に活性化し、これに対する天然物の作用を検討するため、リガンドを用いず好中球を高度に活性化する方法として、本研究では膜貫通領域のアミノ酸配列を持つペプチドを合成し、ヒト好中球における生理活性を評価した。

2. 実験

保護アミノ酸、固相樹脂、試薬は、Nova Biochem、Applied Biosystem、及び蛋白質研究奨励会より購入した。反応溶剤、液体クロマトグラフ用溶媒は和光純薬株式会社から購入した。チトクロームCその他、生物活性評価に用いた試薬は、Sigmaより購入した。カルシウムキレート試薬Fura-2 AMは同仁化学より購入した。

(1) 膜貫通ペプチドのデザインと合成

膜貫通ペプチドのデザインはMiettinenらの報告をもとにおこなった¹⁾。細胞膜の外側に位置すると考えられた部位には親水性配列SKSKSKを付加し、細胞膜の疎水場に埋もれないようにした²⁾。細胞膜の内側に位置すると考えられた部位には、細胞膜に入り、ヘリックス構造をとりやすくするために両末端をアセチル化及びアミド化した。また、膜貫通ペプチド配列中に含まれるCys残基

はジスルフィド結合の形成を避けるためにSer残基に置換した³⁾。Trp残基を含まない膜貫通ペプチドは、HPLC分析及び蛍光分析による膜への配向を検討するために膜の内側に位置すると考えられる部位に新規にTrp残基を付加した。ヒトホルミルペプチド受容体膜貫通部位は脂質二重膜を貫通するため、高い疎水性を有している。また、約30個のアミノ酸から成り、ペプチドとしては比較的長鎖である。そこで今回、ペプチドの合成は迅速なFmoc固相合成法により行った。ヒトホルミルペプチド受容体膜貫通ペプチド(hFPRTM)は高い疎水性により合成の際、高次構造を取る事が考えられたため、固相担体にはリンカー同士の距離が長い、低置換の樹脂(PAL-PEG-PS resin; Applied Biosystems)を用いた。アミノ酸の活性化は*N*-[(1*H*-benzotriazol-1-yl)(dimethylamino)methylene]-*N*-methylmethanaminium hexa fluoro-phosphates *N*-oxide (HBTU) と *N*-hydroxybenzotriazole (HOBT) で行った。固相合成では目的の配列を伸長後、樹脂から切り出すため、液相合成のように順次精製を行う事ができない。そのため固相合成では、各ステップ高収率で得る事が必須である。そこで、2.0倍量のアミノ酸を各反応に用いた。Fmoc基の脱保護はピペリジンで行った。膜貫通性を高めるために2,4,6番目の膜貫通ペプチドのN端をアセチル化し電価をなくした。アセチル化はNMMと無水酢酸で行った。脱樹脂は室温で、TFA/水/フェノール/チオアニソール/エタンジチオール/トリイソプロピルシラン(82.5:5.0:5.0:5.0:2.5:1.0, v/v)で三時間反応させた。得られた粗ペプチドは逆相HPLCにより精製を行った。()膜貫通ペプチドの5番目と7番目の溶離液には水/アセトニトリル/TFA(95:5:0.05, v/v; solution A)と水/アセトニトリル/TFA(5:95:0.04, v/v; solution B)を用いた。()2, 3, 4, 6番目の膜貫通ペプチドには水/ギ酸(2:3, v/v)と2-プロパノール/ギ酸(2:3, v/v)で行った。()1番目の膜貫通ペプチドには水/ギ酸(2:3, v/v; solution A)と2-プロパノール/ギ酸(1:4, v/v; solution B)で行った^{4),5)}。構造の確認はアミノ酸分析とMALDI-TOF MSにより行った。アミノ酸分析は塩酸中110 °Cで24時間加

水分解を行った。MALDI-TOF MSにより生成物の分子量を測定した。MALDI-TOF MSのマトリックスには -cyano-4-hydroxycinnamic acid/アセトニトリルを用いた。

(2) ヒト好中球の単離

ヘパリン採血したヒト静脈末消血をデキストランにより沈降分離し、赤血球を除去した。残存赤血球は低張溶解させた。Ficoll-Paque法で密度勾配遠心分離して、好中球を単離した。単離した好中球は血球算定板を用いて計測後、必要濃度に調製して以下の実験に用いた。ペプチドの希釈には、非特異的吸着を防ぐため、試薬調製に用いた器具は全てシリコナイズ処理したものを使用した。生物活性測定のため、膜貫通ペプチドは20%TFEで必要濃度 ($1 \times 10^{-2} \text{M}$) に溶解し、 Ca^{2+} -free Krebs-Ringer phosphate bufferを用いて順次希釈した。

(3) 活性酸素放出評価

活性酸素の放出はferricytochrom cの還元量として評価した。二波長分光高度計を用い、540nm-550nmの吸光度差を測定する事により評価した⁶⁾。測定用のセル内には細胞懸濁液 ($1 \times 10^6 \text{cells/ml}$)、1mM CaCl_2 、5mM D-グルコース、20mM ferricytochrom cを用いた。膜貫通ペプチド 10^{-6}M 、もしくはリン酸緩衝液を添加しインキュベートし、その後formyl-Met-Leu-Phe-OH (fMLP) 10^{-7}M で細胞を刺激した。その後1分間の活性酸素放出量を計算した。実験は少なくとも異なる細胞で三回行い、評価した。細胞内カルシウム濃度測定には、カルシウムキレート蛍光試薬Fura-2を用いた。好中球をFura-2 AMで処理し、遊離のFura-2を除いた後、測定に使用した。

2. 結果と考察

膜貫通ペプチドは生成により、HPLC分析の結果、いずれも高い純度で調製できた(図-1)。一部のペプチドは、通常のアセトニトリル-水系ではカラムから溶離されず、膜貫通部分の高い疎水性を有していることが確かめられた。これらは、2-プロパノール-ギ酸系で精製出来ることを見いだした。ペプチドの構造は、分子量測定およびアミノ酸分析から確認した。

膜貫通ペプチドの活性酸素放出量の評価はヒト好中球により行った。調製した細胞に各濃度の膜貫通ペプチドを添加した際、ペプチドだけでは活性酸素の放出を誘導しなかった。しかしながら、この膜貫通ペプチドを前投与し、37 でインキュベートした後、fMLPにより刺激するとリン酸緩衝液を前投与した場合と比較して、優位な活性酸素放出量の増大が観測された。これはホルミルペプチド受容体の、4、5、6番目の膜貫通配列をもつペプチドに特異的に観測された。その他の膜貫通ペプチドはリン酸緩衝液を添加した場合と同等の作用を示し、好中球のプライミング作用として観測されなかった。さらに、最も活性酸素放出の増強が観測された4番目の膜貫通ペプチドにおいて、添加濃度を変化させ測定を行ったところ、 10^{-6}M の濃度で最大活性を示し、濃度依存的に活性酸素の放出量が増加した。膜貫通ペプチドは受容体に対しリガンドとして作用している事も考えられたため、4番目の膜貫通ペプチドのフラグメントを合成、活性酸素の放出量について検討した。ペプチドがリガンドとして作用していれば、活性コアを持つフラグメントで同等の作用を示す。しかしながら4番目の膜貫通ペプチドフラグメントでは活性酸素放出量の増大は認められなかった。また、膜貫通ペプチドを添加した後のインキュベート時

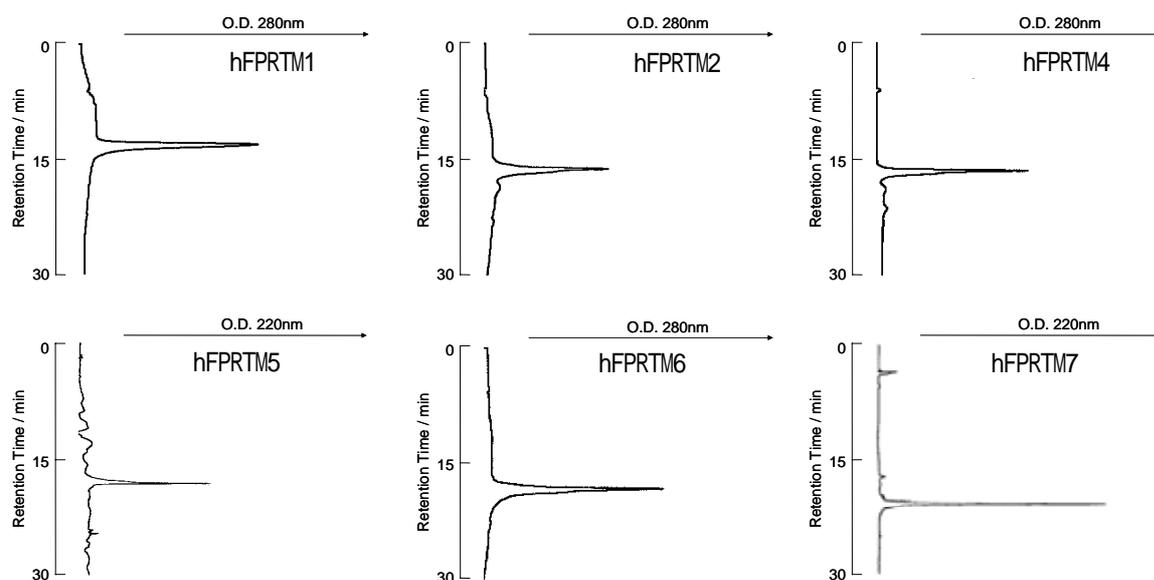


図-1 精製後の膜貫通ペプチドHPLC分析結果

表 - 2 各膜貫通ペプチドの活性酸素放出量

Peptides	Superoxide Production
Control	100
hFPRTM1	122
hFPRTM2	127
hFPRTM3	108
hFPRTM4	364
hFPRTM5	182
hFPRTM6	247
hFPRTM7	92

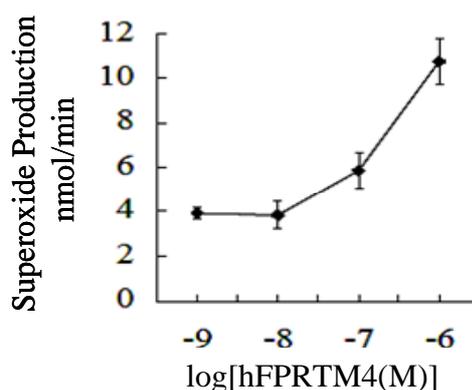


図 - 2 hFPRTM4 の活性酸素放出量の濃度依存性

間の検討を行ったところ 20 分間で最大であった。受容体に対しリガンドとして作用していれば迅速に応答して活性を示すため、このことから膜貫通ペプチドがリガンドとしてではなく、好中球の活性酸素放出の増大を引き起こすことが確認された。また、作用機序を検討するために膜貫通ペプチド投与による細胞内カルシウム濃度変化を検討したところ、活性酸素放出を増大させる効果が認められた膜貫通ペプチドで細胞内カルシウム濃度を上昇させることを見いだした。

また、これまでの研究から膜貫通型受容体において膜貫通領域はヘリックス構造を形成していると考えられている。CD及び蛍光スペクトルの結果より合成した膜貫通ペプチドが本来の受容体と同様に生体膜を貫通した構造を持つことが示された。

以上の結果から、合成膜貫通ペプチド自身に活性酸素放出の刺激作用は認められなかった。しかしながら、特定の膜貫通ペプチドをあらかじめ好中球に作用させた後にアゴニストによる刺激を行うと、アゴニスト単独の刺激時に比べ活性酸素放出量の増大が認められる現象を発見した。膜貫通ペプチドで前処理された細胞系は、リガンド親和性を保持しており、ヒト好中球の高度活性化作用を有する天然物の検索に有用と期待される。今度、いくつかの天然由来機能性物質を用い、好中球への影響を検討する予定である。

謝辞：合成ペプチドの分子量測定にご協力頂きました九州大学大学院理学研究院の下東康幸教授、野瀬健助教授、

産業総合技術研究所九州センターの大庭英樹博士に感謝致します。細胞の分化実験にご協力頂きました佐賀大学医学部小児科学講座の財津正文先生に感謝致します。

参考文献

- 1) Miettinen, H.M., Mills, J.S., Gripenrot, J.M., Dratz, E.A., Granger, B.L., and Jesaitis, A.J., *J. Immunol.*, 159, 4045-4054 (1997).
- 2) Wimley, W.C. and White, S.H., *Biochemistry* 39, 4432-4442 (2000).
- 3) Zhang, P., Johnson, P.S., Zollner, C., Wang, W., Montes, A.E., Seidleck, B.K., Blaschak, C.J., and Surratt, C.K., *Mol. Brain. Res.*, 72,195-204 (1999).
- 4) Bollhage, R., Schmieberger, M., and Grell, E., *J. Chromatogr.*, 711, 181-186 (1995).
- 5) Otaka, A., Ueda, S., Tomita, K., Yano, Y., Tamamura, H., Matsuzaki, K., and Fujii, N., *Chem. Commun.* 7, 1722-1723. (2004).
- 6) Miyazaki, M., Kodama, H., Fujita, I., Hamasaki, Y., Miyazaki, S., and Kondo, M., *J. Biochem.* 117, 489-494 (1995)
- 7) Hayashi, R., Osada, S., Yoshiki, M., Sugiyama, D., Fujita, I., Hamasaki, Y., and Kodama, H., *J. Biochem.*, 139, 981-988 (2006)
- 8) Hayashi, R., Sugiyama, D., Yoshiki, M., Osada, S., Fujita, I., Hamasaki, Y., and Kodama, H., *Peptide Science* 2005, 241-244 (2006)

(2007.3.19受付)

食水系感染症研究部門

Research Division of MARINE & FOOD-BORNE INFECTION

ビブリオ・バルニフィカス感染症対策 — 臨床医学的アプローチ (第二報) —

A *VIBRIO VULNIFICUS* MEASURES
APPROACH OF CLINICAL MEDICINE -THE SECOND REPORT-

中島幹夫¹・大石浩隆²・浦由紀子³・前田祥範⁴・三溝慎次⁵・荒木和邦⁶

Mikio NAKASHIMA, Hirotaka OISHI, Yukiko URA
Yoshinori MAEDA, Shinji MITSUMIZO and Kazukuni ARAKI

1	医博 佐賀大学教授	医学部麻酔・蘇生学	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
2	医博 佐賀大学助教授	有明海総合研究プロジェクト	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
3	佐賀大学助手	医学部附属病院麻酔科蘇生科	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
4	佐賀大学助手	医学部附属病院麻酔科蘇生科	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
5	医博 佐賀大学講師	医学部附属病院集中治療部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
6	医博 佐賀大学講師	医学部附属病院手術部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)

Vibrio vulnificus is found in marine waters around the world coast. Infection with this organism, via ingestion of raw shellfish or exposure to marine water, can cause necrotizing fasciitis and sepsis, which have high mortality and short latent periods. Because of its rapid aggravation and high mortality rate, public education is important to prevent new cases. We worked on enlightenment positively this year sequentially in last year and two institutions participated in a *V. vulnificus* network. From this network, we could obtain information about 9 cases of the *V. vulnificus* suspected patient and 3 of those were confirmed the *V. vulnificus* patients. In Japan, many cases have been reported since 1980, mainly from hospitals in western prefectures. However, because of the sporadic nature of infection outbreaks, a thorough epidemiologic survey has not been done. We studied the epidemiological and clinical characteristics of *V. vulnificus* infections reported in Japan from 1975 to 2005. We identified 185 cases using the medical article search engines over 30 years. It is also highly recommended that patients with pre-existing liver dysfunction should avoid raw fish and limit their exposure to marine water during the summer season.

Key Words : *Vibrio vulnificus*, *Septic shock*, *Necrotizing fasciitis*, *Information network*

1. はじめに

佐賀大学医学部では、平成17年度から『有明海総合研究プロジェクト』の一環として“*Vibrio vulnificus*感染症の撲滅”を目指し研究を開始した。佐賀大医学部附属病院では、これまで*V. vulnificus*18症例の治療に携わったが、全国的には未だ稀な疾患であり、わが国においては詳細な疫学調査も行われていない。また、当院での生存例は4例に過ぎない。

*V. vulnificus*は世界の海域、特に汽水域に分布する好塩

性グラム陰性桿菌である¹⁾。本細菌は健康人には無害であるが、肝障害あるいは免疫機能低下患者が本菌に感染すると、1~3日で電撃的な四肢の筋組織の壊死とともに敗血症性ショックとなり、集中治療を行っても多くは多臓器不全で死亡する²⁾ため、本菌による感染症は極めて緊急度の高い救急疾患である。

佐賀県にはC型肝炎ウイルス保有者が多く、昭和50年から約30年間、肝癌死亡率は全国最悪を更新している。従って、本感染症は佐賀県では厳重な警戒と早急な対策を要する疾患の1つである。しかし本症に対する有効な治療法が確立されていない現在、最も効果的な対策は予

表1. 有明海総合研究プロジェクト食水系感染症研究部門 Working Breakdown Structure (H18年度改訂版)

No	活動名称	研究名称	Pro名	テーマ名称
I	発症予防	積極的疫学調査	A	患者通報ネットワークの構築 発生患者調査とサンプリング
			B	聞き取り調査 対象物調査
			C	検証(パルスフィールド電気泳動法)
		啓発活動	D	啓発用パンフレット作成 広報
		有明海海域環境把握	E	有明海からのビブリオ・バルニフィカス菌サンプリングと周囲環境解析
II	基礎科学 研究	菌挙動に関する研究	F	リモートセンシング(RS)技術を応用したビブリオ・バルニフィカス症予見に関する研究
		病原体特徴に関する研究	G	伊勢湾、三河湾における調査研究
		ピブリオ・バルニフィカス毒素の研究	H	分類に関する研究
			I	WB解析
			J	動物を用いた感染実験 動物を用いた病態生理実験
		菌迅速検出・同定法に関する研究	K	新規培地開発に関する研究
			L	LAMP法を用いた菌迅速検出法の開発
		免疫に関する研究	M	患者血液分析 肝硬変患者血液分析 肝機能正常者血液分析
		新規予防法・治療法開発に関する研究	N	バクテリオファージを用いた新規治療法に関する研究
			O	ワクチン開発に関する研究
III	患者実態 調査と治療	患者実態調査	P	佐賀県に関する実態調査 全国実態調査
		治療法の確立	Q	治療に関する検討



図1. 平成18年度*V. vulnificus*情報ネットワーク機関マップ。黒印(●、■)は新規参画機関。

表2. 平成18年度疑い患者通報一覧

平成18年度疑い患者通報状況(全例皮膚症状あり)

発生月	基礎疾患	魚介類喫食歴	起因菌
5月	肝硬変・肝癌	不明	不明
6月	肝硬変	不明	<i>Acinetobacter</i>
7月	肝硬変・肝癌	あり	<i>V. vulnificus</i>
8月	肝硬変	あり	<i>V. vulnificus</i>
	肝硬変	あり	<i>K. pneumonia</i>
9月	肝硬変・肝癌	あり	<i>S. pyogenes (A-β)</i>
	肝硬変・肝癌	あり	<i>K. oxytoca</i>
	肝硬変	不明	<i>E. coli</i>
12月	肝硬変	あり	<i>V. vulnificus</i>

防とempiric therapyの推進であり、5年間の本プロジェクト2年目の平成18年度の臨床医学的アプローチの成果について報告する。

尚、食水系感染症部門では、5年間の研究対象を、「発症予防」「基礎科学研究」「患者実態調査・治療」の3つの分野とし、臨床医学的および基礎医学的な側面から、それぞれの分野についていくつかの具体的な研究項目を記したWorking Breakdown Structure (表1) を作成している。本稿では関連する各項目で成果が得られたものについて記述する。

2. 発症予防

(1) 患者通報ネットワークの構築

本症は「感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律」に規定されていない感染症であるため、本症のあらゆる臨床医学的及び基礎医学的対策の基礎となるものは情報ネットワークの構築である。初年度(平成17年度)に引き続き本症対策関連機関の新規参画活動を行った。その結果、行政機関である佐賀県庁健康推進課、及び有明海筑後川南方域の大牟田市立総合病院の参

画を得ることができ、関連ネットワーク基幹は合計19機関(当院を除く。佐賀県14機関、福岡県5医療機関)となった(図1)。

(2) 発生患者調査とサンプリング

上記(1)に基づき、平成18年度に当院へ通報があった疑い患者の一覧を表2に示す。平成18年度は湾奥部において少なくとも3例の*V. vulnificus*患者が発生したことになる。また、エルニーニョ現象による暖冬を反映してか、12月にも本症の発症患者が認められた。文献検索上、12月のわが国における発症例は現在まで1例のみであり、極めて稀な例であることが確認された。また、本結果からもわかるように、「肝障害」+「生鮮魚介類喫食歴」+「原因不明の壊死性筋膜炎」を呈する患者は*V. vulnificus*患者のみではなく多岐にわたることが判明した。しかしながらこの結果はまた、医師が上記三主張を認める患者について、*V. vulnificus*症を疑うということが浸透してきているという結果でもあると考えられる。

一方、患者菌と原因食材の遺伝子型の一致(1:1の関係)を証明するための、原因食材のサンプリング及び原因菌の検出では、原因食材が発症時には既に廃棄されていたため入手困難であった。世界的に見ても上記1:1の関係を証明できた例は無く、次年度以降の本プロジェクトの課題の一つである。

(3) 啓発活動

医療機関従事者への啓発活動のため、本年度は以下の啓発活動（講演）を行った。

- a) 「有明海的环境と健康被害」、諫早医師会、2006年5月17日
- b) 「壊死性筋膜炎と有明海」、筑後医師会、2006年6月9日
- c) 「ビブリオ・バルニフィカスによる壊死性筋膜炎」重症患者管理研究会（飯塚病院）2006年8月4日
- d) 「肝機能障害患者に発生するビブリオ・バルニフィカス感染症の予防策」、佐賀県庁健康増進課、2006年9月19日
- e) 「有明海における致死性食水系感染症」岡山麻酔・蘇生セミナー 2007年1月12日

更に、メディアを介した広報活動も重要と考え、*V. vulnificus* 感染症に関する以下の広報活動・情報提供を行った。

- f) 有明海総合研究プロジェクト・ホームページ掲載；ビブリオ・バルニフィカス感染症予防パンフレット
- g) 西日本新聞；新聞報道、2006年8月8日付け記事
- h) 佐賀新聞；新聞報道、2006年9月3日付け記事
- i) 日本経済新聞、北日本新聞、愛媛新聞；新聞報道、2006年10月9日付け記事

また、情報共有のため、新規患者や環境中からの菌検出状況等について、平成18年度は7件の情報提供をネットワーク機関に対し行った。

3. 患者調査と治療³⁾

(1) 全国患者調査の方法

a) 報告例抽出方法

医学中央雑誌（医中誌）、国立情報学研究所論文情報ナビゲータ（CiNii）及びPubMed（National Center for Biotechnology Information）を用い、1975年～2005年12月までの30年間における誌上発表（研究発表、症例報告、会議録および参考文献）を基に、本邦における*V. vulnificus* 感染症患者の報告例を抽出した。医中誌及びCiNiiでの検索キーワードは、「*Vibrio vulnificus*」及び「ビブリオ・バルニフィカス」とし、PubMedでは「*Vibrio vulnificus* [and] Japan」とした。症例抽出に当たっては同一症例が複数の文献に登場している場合があり、患者年齢、性別、発症年月、経過、報告施設などから重複例と判断されるケースは対象から除外し一例とした。

b) 調査項目

患者性別、年齢、発症年月、患者発生地区、基礎疾患、感染経路、転帰を調査した。患者発生地区については報告施設の都道府県とした。年齢分布にはBox and Whisker plot、群間有意差検定にはカイ二乗検定あるいはFisherの直接法を使用し $p < 0.05$ をもって統計学的有意差とした。

(2) 全国患者調査の結果

a) 報告症例数及び性差

1975年～2005年12月までの患者報告数は185例であった。また性別不明の1例を除き、男性164例、女性20例で男女比は8.2：1であった。

b) 患者年齢

年齢不明の5例（男性4例、性別不明1例）を除き、180例について検討を行った。年齢幅は14歳から94歳で中央値は59歳であり、53歳（25%タイル）から65歳（75%タイル）までに患者の半数が含まれていた。男女別に見てみると、男性では中央値が58.5歳で、33歳以下及び83歳以上が外れ値となり14歳男児の報告例は極値であった⁴⁾。一方女性では、中央値が62.5歳で、78歳以上が外れ値となった。

c) 患者発生月の推移

発生月別患者発生推移（ $n = 165$ ）では7～9月に患者の約8割が集中していた。冬季（11月～1月）にも報告例が見られたが2月～4月での報告例はなかった。尚、冬季の一例（11月発症）については、海外旅行中における経口感染が考えられ、帰国後に発症した輸入例が報告されていた⁵⁾。

d) 都道府県別発生状況

本邦の*V. vulnificus*感染症例を報告地域別にみると、九州地方が84件(45.4%)、中国・四国地方26件（14.1%）、関東地方25件（13.5%）、東海地方25件（13.5%）、関西地方17件（9.2%）、北陸・信越地方6件（3.2%）、東北地方2件（1.1%）であった。

都道府県別で見ると患者報告例が多い順に、熊本県（27例）、佐賀県（20例）、福岡県（20例）、愛知県（19例）、東京都（12例）長崎県（10例）となっていた。特に注目すべきは、有明海沿岸の九州北部四県（福岡、佐賀、長崎、熊本）での患者合計が77名と、全国の約4割を占めていた。

e) 感染経路と主訴

*V. vulnificus*の感染経路では、全患者の65.9%に発病半日から数日前に生鮮魚介類を摂取した既往があり経口感染によるものと考えられ、そのほとんどが原発性敗血症を起こしていた。一方、皮膚の創傷部位からの経皮感染と考えられるものは全体の10.8%であった。患者主訴は不明の20例を除き、四肢皮膚症状（73.9%）、発熱・悪寒戦慄（52.1%）、消化器症状（32.7%）、全身倦怠感（6.1%）、血圧低下（5.5%）、頭痛意識障害（4.8%）等が挙げられていた。

表3. 患者転帰

	<i>n</i>	<i>Infection pathway</i>	<i>n</i>	Dead	Cured	unknown	Mortality	<i>p</i> value
Total	185			117	64	4	64.6%	
Sex								
male	164			103	58	3	64%	} 0.702 ^{a)}
female	20			13	6	1	68.4%	
unknown	1			1				
Infection Pathway								
	185	<i>OI</i>	122	82	39	1	67.8%	} 0.0024 ^{a)}
		<i>W</i>	20	6	13	1	31.6%	
		<i>OI+W</i>	2		2			
		<i>unknown</i>	41	29	10	2		
Underlying disease								
liver disfunction	167	<i>OI</i>	114	78	35	1	69%	} 0.098 ^{a)}
		<i>W</i>	14	6	7	1	46.2%	
		<i>OI+W</i>	1		1		69.3%	
		<i>unknown</i>	38	29	7	2		
other disease	9	<i>OI</i>	5	3	2			} 0.0001 ^{b)}
		<i>W</i>	1		1			
		<i>OI+W</i>	1		1		33.3%	
		<i>unknown</i>	2		2			
none	7	<i>OI</i>	1		1			}
		<i>W</i>	5		5		0%	
		<i>unknown</i>	1		1			

^{a)} chi-square test for independence, ^{b)} Fisher's exact test, OI; oral ingestion, W; wound.

f) 患者基礎疾患

患者基礎疾患の有無および内訳についての調査を行った。約9割は何らかの肝臓疾患を有しており（185例中167例）、その中でも肝硬変を基礎としたものが73.1%（122例）を占めていた。肝疾患以外の基礎疾患としては、膵癌や多発性骨髄腫、骨髄異形成症候群、高血圧、喘息（各1例）が見られた。また、糖尿病のみを基礎疾患に持っていた患者は4例に過ぎなかった。明確な基礎疾患を持たずに発症した例（7例、3.8%）も見られた。

g) 患者転帰

表3に患者の転帰を記す。全患者の転帰は、死亡117例、軽快64例、不明4例であり、死亡率は64.6%であった。男女間には死亡率の有意差は見られなかった($p=0.702$)。単なる感染経路別の死亡率では、経口感染型（原発性敗血症型）と創傷感染型の間に有意な差が見られた（経口感染による死亡率67.8%、創傷感染による死亡率31.6%、 $p=0.0024$ ）。肝機能障害を持つ症例の死亡率は69.3%（転帰不明の4例を除く163例中113例が死亡）、肝機能障害以外の他の基礎疾患を持つ症例（悪性疾患等）では33.3%（9例中3例が死亡）で、基礎疾患がない7症例では全例が軽快しており、肝機能障害群とそれ以外の群の死亡率には有意差が認められた($p=0.0001$)。更に肝機能障害者での感染経路別死亡率を見てみると、経口感染型は69%、創

傷型では46.2%であり感染経路別による死亡率には差が見られなかった($p=0.098$)。一方肝機能障害以外の基礎疾患を持つ症例では、経口的に感染発症した5例のうち3例が死亡していた。

4. 考察

ここでは臨床医学的側面から平成18年度の成果の概要について報告し、基礎医学的研究成果および個別の研究成果については本報告集の他項に譲る（大石・中島ら『ビブリオバルニフィカス感染症対策-基礎医学的アプローチ-第二報』、高柳ら『環境及びヒト由来ビブリオ・バルニフィカスの遺伝子学的相同性の検討』、三溝ら『当院で経験した敗血症の2例』参照）。

本疾患の救命のためには、早期診断、早期治療であるが、発症から敗血症性ショックへの進行が数時間で進行するため、本疾患の治療の基本は確定診断に至る前に、本疾患を疑い、早期に有効と思われる抗生剤を投与するとともに、早期の壊死組織除去（患肢の切断を含む）と全身管理を行うことである。しかし、考えられうる様々な治療を行っても現時点では死亡率の減少につながる有

効な対策はない。したがって、本感染症に対しては予防に重点を置くのが現実的であり、平成17年度に引き続き、有明海沿岸の医療機関および地域住民に対し積極的な啓発活動を展開した。

昨年度の啓発活動は、海産物への風評被害を防止する観点から医療機関を通じて行ってきた。しかし、本感染症の発生時期は、腸炎ビブリオ等の食中毒の好発時期と重なり、予防も一般的食中毒の場合と同様であるため、今年度は行政機関や地域の医師会等を通じ、適切かつ広範に行った。さらに今後、我々が昨年度開発した*V. vulnificus*用の新規培養培地を保健所等の検査機関へ配布予定としている。この*V. vulnificus*を従来の半分の時間で容易に検出できる新しい培地（報告集第2巻、中島由佳理 他『発色合成基質寒天培地(CVA1)を利用した*Vibrio vulnificus*の検出と迅速同定法の開発』）は、本年度臨床例に検証応用したが、発症10時間で早期診断が可能であった。今後は市販も視野に入れて、本新規培地を広く応用する予定である。

謝辞：*Vibrio vulnificus*感染症情報ネットワークに参加いただいた佐賀県立病院好生館、社会保険佐賀病院、国立病院機構嬉野医療センター、多久市立病院、武雄市民病院、唐津赤十字病院、社会保険浦ノ崎病院、伊万里市民病院、有田共立病院、太良町立病院、織田病院、白石共立病院、小柳記念病院、佐賀県健康推進課(以上佐賀県)、久留米

大学救急救命センター、聖マリア病院、高木病院、福岡県立柳川病院、大牟田市立総合病院（以上福岡県筑後地区）に深謝申し上げる。また本症の対策について多大なご支援を頂いている佐賀大学医学部附属病院検査部、出原教授、青木助教授に深謝申し上げる。

参考文献

- 1) Farmer JJ, 3rd: *Vibrio* ("Benecke") *vulnificus*, the bacterium associated with sepsis, septicaemia, and the sea. *Lancet* 1979;2(8148):903.
- 2) 三溝慎次, 中島幹夫, 前田祥範, 吉田昌人, 十時忠秀: *Vibrio vulnificus*による壊死性筋膜炎11症例の検討. *ICUとCCU* 2001;25(11):857-61.
- 3) Oishi H, Ura Y, Mitsumizo S, Nakashima M: [A collective review of *Vibrio vulnificus* infection in Japan]. *Kansenshogaku Zasshi* 2006;80(6):680-9.
- 4) 佐藤征, 三浦富智, 齋藤雅明, 月足正辰, 本郷俊治, 戸羽隆宏: 中耳炎及び敗血症例から分離された *Vibrio vulnificus* の PCR 法による同定. *感染症学雑誌* 2001;75(4):307-13.
- 5) 出口順夫, 登政和, 田中信孝: 急激な転帰をとった *Vibrio vulnificus*敗血症の1例. *日本臨床外科医学会雑誌* (0386-9776) 1993;54(6):1493-6.

(2007. 3. 19受付)

ビブリオ・バルニフィカス感染症対策 — 基礎医学的アプローチ (第二報) —

A *VIBRIO VULNIFICUS* MEASURES APPROACH OF BASIC MEDICINE -THE SECOND REPORT-

大石浩隆¹・中島幹夫²・中島由佳理³・高柳恵⁴・草場耕二⁵・永沢善三⁶

Hiroataka OISHI, Mikio NAKASHIMA, Yukari NAKASHIMA
Megumi TAKAYANAGI, Kouji KUSABA and Zenzo NAGASAWA

- | | | |
|---|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 医博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 2 | 医博 佐賀大学医学部教授 麻酔・蘇生学 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 3 | 佐賀大学医学部臨床検査技師 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 4 | 佐賀大学医学部臨床検査技師 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 5 | 佐賀大学医学部主任臨床検査技師 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 6 | 医博 佐賀大学医学部副臨床検査技師長 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |

Vibrio vulnificus is a halophilic gram-negative rod bacterium in marine waters categorized at 1979 by Farmer. This causes necrotizing fasciitis and sepsis mainly in patients with liver dysfunction through ingestion of raw fish or shellfish, which has high mortality and short latent period.

It has not been fully understood about the behavior, virulence of *Vibrio vulnificus*, risk factors of the patients, and so on. We are carrying out the prevention promotion, basic and clinical studies as measures of this fatal disease. Promotion of basic medical studies may lead to more appropriate treatment and preventive measures. The approach of basic medicine of *Vibrio vulnificus* infections is discussed.

Our results of this year are as follows,

- 1) *Vibrio vulnificus* was detected until November, and it was thought with influence of a warmer winter.
- 2) We made an animal infection model for *Vibrio vulnificus*.
- 3) An advantage of CVA-1 as early diagnosis was recognized on clinical setting for the first time.
- 4) IgG Antibody titer for *Vibrio vulnificus* was high in the population with a liver dysfunction but not in those with normal liver function.

Key Words : *Vibrio vulnificus*, Basic Medicine

1. はじめに

平成17年4月より、佐賀大学では有明海異変に取り組むために全学部横断的な有明海総合研究プロジェクトが組織され、医学部及び附属病院では致死性の食水系感染症である*Vibrio vulnificus* (ビブリオ・バルニフィカス) 症、別名“人食いバクテリア”に対する臨床医学的、基礎医学的研究を開始している。

我々は本症の対策として「予防」「科学研究」「治療」の3本柱を立て実施中である。本稿は昨年1年間の本疾患対策で、主に基礎医学的研究成果について報告する

{中島ら; ビブリオ・バルニフィカス感染症対策-臨床医学的アプローチ (第二報) -表1 (Working Breakdown Structure) 参照}。

2. 有明海からの*V. vulnificus*菌サンプリング

我々の現在までの調査により、本邦における*V. vulnificus*感染症の多くは有明海を囲む北部九州四県から報告されていることが明らかとなっている^{1) 2)}。このことから、昨年度に引き続き有明海定点における菌検出状

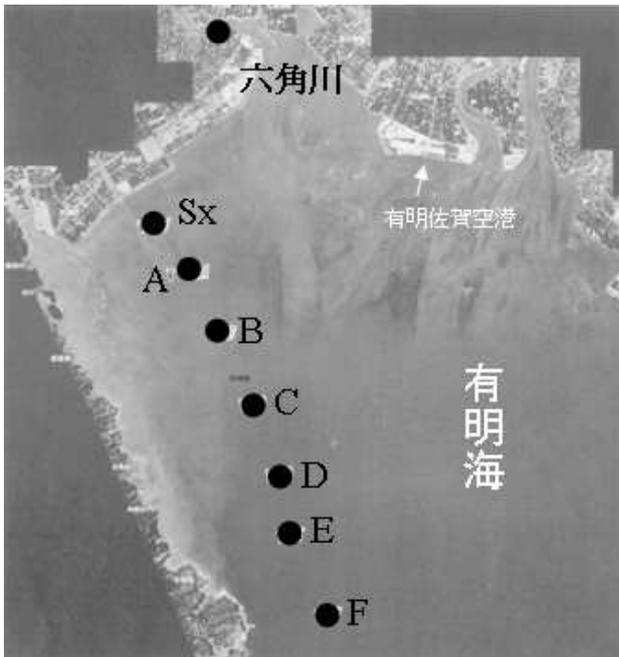


図1. 海水採水点 (●)。全8地点 (六角川～Fまで)

表1. 平成18年度の有明海採水点における *V. vulnificus* 検出状況

地点	深度 (m)	7/30	8/25	9/23	10/1	11/14	12/15	1/14	2/14
六角川		Vv	Vv	Vv		Vv, Vf	Vp	Vp	
Sx1	1	Vv	Vv	Vv	Vv, Vp	Vv, Vp	Vp	Vp	
	B	Vv	Vv	Vv			Vp		
A	1	Vv	Vv	Vp					
	4	Vv	Vv	Vv					
	B	Vv	Vv						
B	1	Vv			Vv				
	5	Vv							
	B	Vv	Vp						
C	1	Vv		Vv					
	5	Vv							
	10	Vv		Vv					
	B	Vv			Vv		Vp		
D	1	Vv							
	5	Vv							
	10	Vv	Va						
	B	Vv							
E	1		Vp						
	5	Vv							
	10	Vv							
	15	Vv							
F	B	Vv					Vp		
	1				Vv				
	5	Vv							
	10	Vv							
F	15	Vv							
	B	Vv							

Vv; *V. vulnificus*, Vp; *V. parahaemolyticus*, Va; *V. alginolyticus*
 Vf; *V. fluvialis*。空欄は未検出。
 深度は鉛直方向で、「B」は海底部分を示す。

況調査 (環境モニタリング) を行った。

<方法等>

(1) 採水

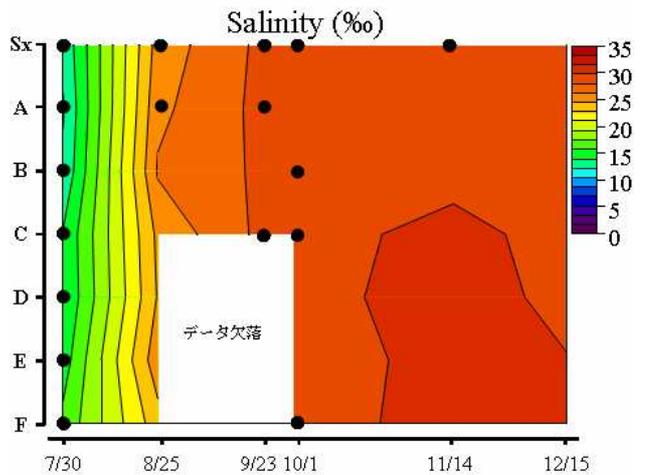
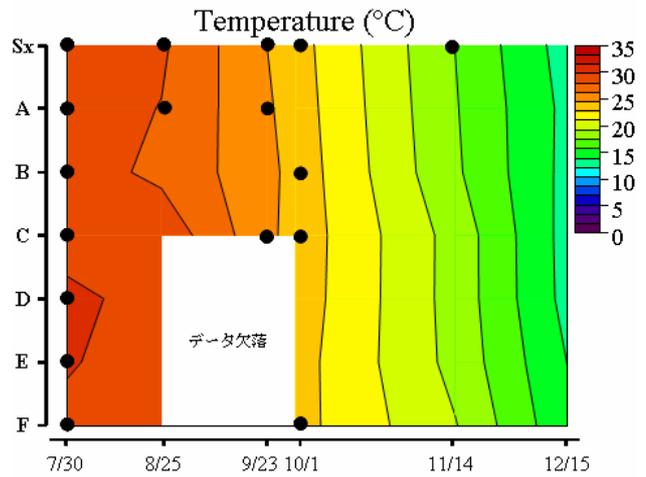


図2. 定点における表層1m下の温度 (上図) 及び塩分 (下図) 変化。黒丸 (●) は *V. vulnificus* 検出。

平成18年7月30日から平成19年2月14日までに、図1に示す8定点より計6回採水した。

(2) 菌培養

採取した海水サンプルを遠心し、沈渣にアルカリペプトン水を混和して35°Cで約15時間培養した。その後培養液をCVA-1 培地 (ビブリオ属選択増菌培地³⁾, 本稿4. 「新規培養培地の臨床応用」参照。) に塗布し、更に35°Cで約24時間培養後、検出されたコロニーを解析・同定した。

<結果と考察>

平成18年度の有明海定点からの菌検出状況を表1に示す。現在まで、他の研究者らが報告している海水環境からの *V. vulnificus* 検出は、ほとんどが河口や漁港から採水したサンプルのみであるが、我々は塩田川沖海底水道に沿った海洋上でのサンプリング調査を行っている。その結果、7月には六角川や沿岸部(Sx)から有明海沖合(F)全てで *V. vulnificus* 菌が確認された。また、平成17年度は7月のみ菌の検出が確認されたが、今年度は11月中旬にも菌が検出されており、暖冬の影響が反映していると考えられる。

*V. vulnificus*は水温が17°C以上で増殖が活発となり⁴⁾、塩分濃度30‰以上で検出菌数が激減すると言われている⁵⁾。そこで有明海水温及び塩分濃度の変化と、菌検出状況について調査した。図2は有明海定点における表層1m下の温度(上図)・塩分濃度(下図)のイソプレットである。沿岸部から沖合にかけて塩分濃度が高くなり、かつ冬季は夏季に比べ塩分濃度が上昇していく推移がわかる。菌検出は、上述の報告と同じく海水温17.5~30°C程度、塩分濃度12~28.5‰の範囲内で検出されたが、今冬は12月でも菌が増殖できる環境であったことが等値線の推移より考えられた。事実、平成18年12月にはネットワーク病院から*V. vulnificus*患者発生報告があり(現在まで12月における患者発生報告は、1987年の1例⁶⁾のみ)、本年の記録的な大雨及び暖冬の結果であると推測された。

3. 小動物を用いた感染実験

グラム陰性桿菌であるビブリオ・バルニフィカスの病原性及び重症化の機序については、未だ不明な点が多く、菌体因子の他に、蛋白質性の直接的障害因子(外毒素)として溶血毒素、プロテアーゼ、ホスホリパーゼ等が挙げられているが⁷⁾、必ずしも電撃的に進行する本疾患の病原性をうまく説明できていない。また、有明海総合研究プロジェクト微生物相研究部門と共同研究中のバクテリオファージを使用した新規の治療法開発(佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集第3巻、田代ら「有明海干潟泥中の細菌相解析とビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリオファージの分離」参照)の前提として、動物実験モデルを確立する必要があり、今回マウスを用いたモデル作成を行った。尚、本実験は、佐賀大学動物実験倫理委員会による承認後に実施した。

<方法等>

(1) 菌液調整

H18年7月に創傷型感染で発症したヒト由来株(VulMY株)を用いた。菌は増菌培地で培養後、0.45%生理食塩水にてマクファーランド3(=1.2x10⁹CFU)、OD=0.5の水溶液に調整した。

(2) 使用動物

C57BL/6Jマウス、11週齢(体重27.5g~30g)6匹。

(3) 投与量と摂取部位

右後肢足底部;0.45%生理食塩水0.01ml

左後肢足底部;ヒト由来株10⁷CFU/マウス(投与量として0.01ml)

摂取は各足底部へ皮下注射を行った(footpad法)

<結果と考察>

全例について投与2時間後程度から*V. vulnificus*摂取側下肢の腫脹が認められた。投与後の下肢所見の経時変化を図3に示す。腫脹は足底部から大腿部まで広がった。6匹中2匹が投与後26時間以内に死亡し、その下肢浸出液



図3. Footpad法による*V. vulnificus*感染実験での皮膚計時変化。摂取約2時間後より、菌投与側(左足)の腫脹が認められた。

から*V. vulnificus*が検出された。他の4匹は投与1ヶ月後まで生存し(その後安楽死)、腫脹は軽快していた。

我々のpreliminary実験では、腹腔内への*V. vulnificus*菌の投与(10⁸~10⁴CFU/マウス)では発症させることが出来なかったため、今回足底部への投与に変更することで感染モデルを作成することが出来た。今後は本モデルを使用し、①HPLC等で菌の分画成分を分離抽出し、より詳細な毒素に関する実験や、②複数のヒト由来株を指示菌とした、宿主特異性の低い*V. vulnificus*バクテリオファージの検索とそれを応用した新規治療法開発への応用を予定している。

4. 新規培養培地の臨床応用例

*V. vulnificus*感染症は激症型の推移を取る為、迅速な菌の同定作業が必要となる。壊死性筋膜炎を起こす菌のうち*V. vulnificus*を特異的に培養し早期診断を可能とするために、我々は昨年度、栄研化学株式会社と共同で新規の培養培地を開発した³⁾。今年度はCVA-1の臨床現場にお

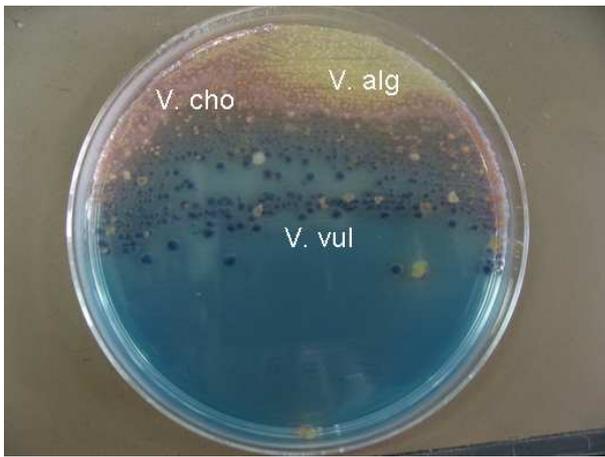


図4. CVA-1培地上での菌種。発色性の違いでの菌種の識別が可能。有明海海中より検出。
V. cho; *V. cholerae*, *V. alg*; *V. alginolyticus*
V. vul; *V. vulnificus*

ける有用性検証のため、細菌検査室を備えるネットワーク病院へ配布しており、その中で臨床応用が可能であった例について報告する。

<症例報告>

アルコール性肝障害を基礎疾患に持つ73歳の男性が、両下肢の激痛を主訴に近医を受診した。症状出現の前日に魚介類の喫食歴があった。発症当日の夜9時頃近医より高度医療機関へ搬送され、壊死性筋膜炎の診断の下、下肢の皮膚所見部位から採取された検体について通常寒天培地及びCVA-1を用いた培養が開始された（夜10時～）。その結果、翌日朝8時半頃（培養開始約11時間後）には、CVA-1上にて、*V. vulnificus*に特異的な濃紺色・ムコイド型のコロニーを認めたため、強く*V. vulnificus*による感染が示唆された。確定診断は、その後のコロニーの生化学検査により行われ、その結果判明までの時間は、来院から48時間後であった。

<結果と考察>

壊死性筋膜炎患者において、早期に本症を鑑別診断する方法としてCVA-1が有用であった事例を紹介した。本手法は通常の菌培養操作にCVA-1培地を1枚追加するのみの簡便な方法であり、生化学同定作業が困難な（試験機器が無い）機関等においても早期に本症を疑うことが可能であると考えられる。

壊死性筋膜炎は種々の細菌により発症するが、その中でも特に*V. vulnificus*感染症は、予後不良で激しい経過を取るため、早期診断、早期治療が重要な感染症である。CVA-1を用い早期に本症を診断することで、効果的な抗生剤の選択等の治療は当然のことながら、更に医療責務の遂行（患者家族への原因菌や予後の説明等）、より高次の医療機関への迅速な患者搬送対応、あるいは早期からの積極的な治療（患肢離断術等）等の判断材料になるのではないかと考えている。

表2. 16S rRNA用プライマー配列

8-519-S	5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3'
8-519-A	5'-ATT ACC GCS GCT GCT G-3'

表3. PCR反応溶液組成

	μL
Template DNA	2.0
Primer Forward (8-519-S)	2.5
Primer Reverse (8-519-A)	2.5
dNTPs	1.0
MgCl ₂	5.0
Buffer B	5.0
Taq Polymerase	0.5
H ₂ O	31.5
Total	50.0

更に本培地は、*V. cholerae*, *V. parahaemolyticus*, *V. alginolyticus*等の食中毒を起こすビブリオ属病原細菌を、その発色性で一度に区別することが可能であるため（図4）、平成19年度には環境モニタリングのツールとして、佐賀県内の保健所等の行政検査機関への配布を予定している。

5. 血清抗体価の測定

未だ本症に対する有効な治療法が確立していない現在では、感染・発症前に重症化しやすい患者を洗い出し、適切な生活指導による予防が重要かつ効率的である。今回は患者血清に加え、未発症者（ハイリスク群としての肝機能異常者、及びローリスク群としての肝機能正常者）の血清を用い、本菌に対する血清抗体価を測定した。

<方法等>

(1) 使用菌種の決定

Nilssonらは、*V. vulnificus*の16S rRNA gene 配列の差異により、Type A (*V. vulnificus* ATCC27562^T)に代表される非病原性の株と、Type B (*V. vulnificus* C7184株に代表される病原性株)に識別が可能であると報告している⁸⁾。識別は、Type AであるGene Bank Accession numbers=X76333 (ATCC27562^T)と、Type Bである同X76334 (C7184)の16S rRNA gene 配列のPosition 39-530における492bpの塩基配列の違いに基づいているが、実験に供する菌株としてA、Bからそれぞれ2種類ずつを選定した。

(2) 16S rRNA gene解析

佐賀大学保存の*V. vulnificus*株（ヒト及び有明海由来株）及び*V. parahaemolyticus*株をCVA-1培地上にて増殖さ

表4. PCR反応条件

94 °C	3 min	30 cycle
94 °C	30 sec	
53 °C	30 sec	
72 °C	1 min	
72 °C	10 min	
10 °C	pause	

表5. 使用菌株

Strain Name	Source	Identification by VITEK2	Identities by BLAST(%)	Type
vul4C	clinical	<i>V. Vulnificus</i>	99	B
vul5C	clinical	<i>V. Vulnificus</i>	100	A
ATCC27562	ATCC (clinical)	<i>V. Vulnificus</i>	100	A
Marine	environment (from Ariake Sea)	<i>V. Vulnificus</i>	100	B
ATCC17802	ATCC	<i>V. Parahaemolyticus</i>	99	-

せ、コロニーの遠心分離操作により菌体を回収した。さらにゲノム抽出キットであるQIAmp DNA Mini Kit (QIAGEN, USA)を使用しゲノムDNAを抽出した。抽出したゲノムDNAを鋳型として表2に示すプライマーと Taq DNA polymerase (Promega, USA) を用いて16S r DNAのポジション8~519の約500bpの領域についてPCR反応及びシーケンス解析を行った。反応液組成を表3に示す。

PCR反応条件は、表4のように変性を94 °Cで30秒間、アニーリングを53 °Cで30秒間、伸長を72 °Cで1分間とし、このサイクルを30回行った。さらにPCR産物は、精製キット(QIAquick PCR Purification Kit, QIAGEN, USA)を用いて精製し、得られたPCR生成産物をゲル電気泳動に供し目的バンドの確認を行った。

次に、目的PCR産物の配列解析を行うために、(株)ジーネットにシーケンス解析を依頼した。

得られた配列は、データベース (BLAST program of the National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>) で相同性検索を行った。その結果をもとに表5に示す菌株を選択し、これら5株を用いて血清抗体価を測定した。

(3) 血清抗体価測定方法

Micro-IF assay法を用いて次の3群のヒト血清を用い、*V. vulnificus*及び*V. parahaemolyticus*菌抗体価を測定した。

- ① *V. vulnificus*発症患者 (Vul群) 11例
(死亡4例、軽快6例、不明1例)
- ② 未発症の肝機能障害者 (CLD群) 27例
- ③ 未発症の肝機能正常者 (NLF群) 10例

実験手順を下記に示す。

- a) 上記保存血清を希釈
スライドウェル上で、希釈血清 (一次抗体) と、

Patient Case ID	prognosis	Sample collection day	<i>V. vulnificus</i>			<i>V. Parahaemolyticus</i>		
			clinical strain			Marine	ATCC17802	
			vul4C	vul5C	ATCC27562			
1	dead	onset day (day 1)	-	-	-	+	+	
		onset the second day (day 2)	-	-	-	-	+	
		day 5	+	+	+	+	-	
		day 7	+	+	+	+	+	
		day 8	+	+	+	+	+	
		day 12	+	+	+	+	+	
		day 15	+	+	+	+	+	
		day 18	+	+	+	+	+	
		day 25	+	+	+	+	+	
		day 31	+	+	+	+	+	
		day 33	+	+	+	+	+	
		2	day 1	+	-	+	-	-
			day 4	-	-	-	-	-
			day 2	-	-	-	-	-
		3	day 1	+	+	+	+	+
			day 2	+	+	+	+	+
			day 3	-	-	-	-	-
		4	day 1	+	+	+	+	+
			day 2	+	+	+	+	+
day 3	-		-	-	-	-		
5	cured	day 1	+	+	+	+	+	
		day 2	+	+	+	+	+	
		day 3	+	+	+	+	+	
		day 2	+	+	+	+	+	
		onset one month later	+	+	+	+	+	
		onset two month later	+	+	+	+	+	
		day 2	+	+	+	-	+	
		onset one month later	+	+	+	+	+	
		onset one month later	+	+	+	+	+	
		onset two month later	+	+	+	+	+	
6	cured	onset three month later	+	+	+	-	+	
		day 1	+	+	+	+	+	
		day 2	+	+	+	+	-	
		day 3	+	+	+	+	+	
		day 4	+	+	+	+	+	
		day 5	+	+	+	+	+	
		day 6	+	+	+	+	+	
		day 7	+	+	+	+	+	
		day 9	+	+	+	+	+	
		day 11	+	+	+	+	+	
7	cured	day 12	+	+	+	+	+	
		day 14	+	+	+	+	+	
		day 16	+	+	+	+	+	
		day 17	-	+	+	-	-	
		day 19	+	+	+	+	+	
		8	unknown	-	-	-	+	-
			unknown	-	-	-	+	-

図5. *V. vulnificus*患者群の抗体価測定

1%ホルマリン固定菌体を 37°C30 分間反応後洗浄。

b) FITC (fluorescein isothiocyanate)標識抗 IgG 抗体を 37°C30 分間反応させ、グリセリンにて封入。

c) 蛍光顕微鏡 (波長 488nm) で観察。

d) 40 倍以上の希釈でも蛍光反応がある場合を、抗体陽性のカットオフ値とした。

<結果と考察>

*V. vulnificus*発症患者群 (図5) では、発症初期の血清抗体価が死亡例において低値を示している一方、軽快例では発症初期から高い抗体価を示すものが多く、かつ NilssonらのType A, Bの菌区分による差ははっきりとしなかった。

次に未発症の2群 (肝機能障害者群、肝機能正常者群) では、*V. vulnificus*菌に対する抗体価は肝機能障害者群が高い陽性率 (63~92.6%) を示したのに対し、肝機能正常者群 (正常者群) では低い陽性率 (0~30%) であった (図6)。また、Type別の陽性率には有意差が認められなかった (肝機能障害者群におけるType A, B別の陽性率に関する χ^2 検定; $p=0.093$, 同肝機能正常者群; $p=0.408$)。更に、対照菌として使用した*V. parahaemolyticus*に対する抗体価においても、肝機能障害者群と肝機能正常者群間において有意差は認められなかった ($p=0.442$)。

我々は昨年度、患者血清9例を用いてMIF法による抗原抗体価を測定し、その結果より以下の仮説を立てていた。「海水中に生育している*V. vulnificus*菌を魚介類等の生食を通して我々は日常的に摂取しているが、通常の肝

Case ID	<i>V. vulnificus</i>				<i>V. Parahaemolyticus</i>	
	clinical strain			Marine	ATCC17802	
	Vul4C	Vul5C	ATCC27562			
CLD	1	+	+	+	+	+
	2	+	+	+	+	+
	3	+	+	+	+	+
	4	+	-	+	+	-
	5	+	+	+	+	+
	6	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	-	-
	8	+	+	+	+	-
	9	-	-	+	-	-
	10	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	-	-
	12	-	+	+	+	-
	13	+	+	+	+	+
	14	+	+	+	-	+
	15	+	+	+	-	+
	16	+	+	+	+	+
	17	+	-	+	-	-
	18	+	+	+	+	+
	19	+	+	+	+	+
	20	-	-	-	-	-
	21	+	+	+	+	+
	22	+	+	+	+	+
	23	+	+	+	+	+
	24	+	+	+	-	+
	25	+	+	+	+	+
	26	-	+	+	-	+
	27	-	-	-	-	+
Positive rate (%)	81.5	81.5	92.6	63.0	74.1	
Case ID	<i>V. vulnificus</i>				<i>V. Parahaemolyticus</i>	
	clinical strain			Marine	ATCC17802	
	Vul4C	Vul5C	ATCC27562			
NLF	1	+	-	+	+	+
	2	-	-	-	+	+
	3	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	+
	5	+	-	+	+	+
	6	-	-	-	-	+
	7	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	+
	10	-	-	-	-	-
Positive rate (%)	20	0	20	30	60	

図6. 未発症群の抗体価測定
CLD: 肝機能障害者、NLF ; 肝機能正常者

機能（正常な食細胞機能、門脈―大静脈シャントが無い、遊離鉄の上昇無しなど）を保持していれば免疫系を発動することなく菌が処理され未発症に終わる。一方肝機能障害があるものでは、肝臓での適切な菌の処理が行われず、免疫機能が働きますが、その時点で抗体価が高いものは未発症か、或いは発症しても予後が良く、抗体を持たない患者については発症あるいは重症化する。」

今回の未発症者での検討では、肝機能障害者群の方が *V. vulnificus* に対する抗体価は高く、肝機能正常者群では逆に低いという結果となった。我々の仮説が正しいとするならば、肝機能障害者群の中で、CLD-20及びCLD-27の被検者は、もし感染した場合、発症し重篤になるリスクが高いことが示唆される。また感染予防のためにも重点的な啓発を行う必要があると言える。

また16S rRNA gene 塩基配列の違いに基づいた病原性・非病原性別の抗体価の検討ではどちらのタイプでも感染を惹起し、発症させることが明らかとなった。

次年度は本結果を踏まえ、抗原の同定をウエスタンブロット及び二次元電気泳動法等を用い検索する予定としている。

6. 結語

平成18年度の基礎医学的研究成果について報告した。我々は平成18～19年度をビブリオ・バルニフィカス感染症対策のデフィニションフェーズと位置づけており、現在実施中の各対策、及び更に発展的なテーマ等について次年度以降も推進していく予定である。

謝辞：各研究の実施に際し聖マリア病院検査部、宇宙航空研究開発機構東端晃先生、栄研化学株式会社、北里バイオメディカル研究所、有明海総合研究プロジェクト微生物相研究部門小林先生、田代研究員にご教示頂いた。心より感謝申し上げます。また、有明海海水サンプルを提供していただいたコア研究1・速水、山本両先生に深謝申し上げます。

参考文献

- Oishi H, Ura Y, Mitsumizo S, Nakashima M: [A collective review of *Vibrio vulnificus* infection in Japan]. *Kansenshogaku Zasshi* 2006;80(6):680-9.
- 中島幹夫, 三溝慎次, 吉田昌人, 十時忠秀: 本邦におけるビブリオ・バルニフィカス感染症の地域性. *日本集中治療医学会雑誌* 2003;10(Suppl.):225.
- 中島由佳理, 高柳恵, 草場耕二, 永沢善三, 大石浩隆, 中島幹夫, 小松理, 馬目功: 発色合成基質培地 (CVA-1) を利用した *Vibrio vulnificus* の検出と迅速同定法の開発. *佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集* 2006;第2巻:137-40.
- Kelly MT: Effect of temperature and salinity on *Vibrio (Beneckea) vulnificus* occurrence in a Gulf Coast environment. *Appl Environ Microbiol* 1982;44(4):820-4.
- 福島博: 島根県における腸炎ビブリオおよびビブリオ・バルニフィカス感染症予防に関する研究(II) 島根県沿岸における腸炎ビブリオおよびビブリオ・バルニフィカスの分布調査. *島根県保健環境科学研究所報* 2004(45):51-62.
- 瀬戸口正幸, 森川実, 古川正人, 中田俊則: *Vibrio vulnificus* による急性胆嚢炎の1例. *日本消化器病学会雑誌* 1989;第86巻臨時増刊号:308.
- Kothary MH, Kreger AS: Production and partial characterization of an elastolytic protease of *Vibrio vulnificus*. *Infect Immun* 1985;50(2):534-40.
- Nilsson WB, Paranjypte RN, DePaola A, Strom MS: Sequence polymorphism of the 16S rRNA gene of *Vibrio vulnificus* is a possible indicator of strain virulence. *J Clin Microbiol* 2003;41(1):442-6.

(2007. 3. 19受付)

当院で経験した敗血症性ショックの2症例

TWO CASES WITH SEPTIC SHOCK IN SAGA MEDICAL SCHOOL HOSPITAL

三溝慎次¹・濱田 献²・鈴木有希³・荒木和邦⁴・大石浩隆⁵・中島幹夫⁶
 Shinji MITSUMIZO, Sasagu HAMADA, Yuki SUZUKI,
 Kazukuni ARAKI, Hirotaka OISHI and Mikio NAKASHIMA

1	医博 佐賀大学講師	医学部附属病院集中治療部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
2	佐賀大学助手	医学部附属病院集中治療部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
3	佐賀大学医員	医学部附属病院麻酔科蘇生科	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
4	医博 佐賀大学講師	医学部附属病院手術部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
5	医博 佐賀大学助教授	有明海総合研究プロジェクト	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
6	医博 佐賀大学教授	医学部麻酔・蘇生学	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)

We experienced two cases of septic shock. In the first case, a 54-year-old female with no history of remarkable underlying disease was admitted to our hospital due to septic shock caused by *Streptococcus pneumoniae*. Her clinical symptoms and progress resembled overwhelming postsplenectomy infection, but did not suggest splenic dysfunction. This patient did not survive in spite of intensive care. In the second case, 70-year-old male after closure of temporal colostomy had sudden onset of septic shock. The cause of this sepsis was thought according to bacterial translocation, since there was no intraabdominal active lesion. In spite of the severity of the clinical pictures, this patient survived due to intensive care including Polymyxin-B immobilized fiber-direct hemoperfusion.

Because of the high morbidity and mortality associated with septic shock, effective treatment including early diagnosis of the disease, aggressive antibiotic therapy, and supportive care are important.

Key Words: Sepsis, *Streptococcus pneumoniae*, *Krebsiella pneumoniae*, bacterial translocation
 Polymyxin-B immobilized fiber-direct hemoperfusion (PMX-DHP)

1. はじめに

敗血症は *Vibrio vulnificus* 感染症等の重篤な感染症により全身性炎症性疾患 (SIRS; systemic inflammatory response syndrome) を引き起こした状態で、症例によっては劇的に進行する。また、急激かつ重篤な経過をたどり、敗血症性ショックや播種性血管内凝固症候群 (DIC; disseminated intravascular coagulation) を併発して死に至ることもある。敗血症の治療としては、厳密な全身管理、適切な抗生剤の使用、PMX-DHP (polymyxin-B immobilized fiber-direct hemoperfusion) を使用したエンドトキシン、サイトカイン除去療法などがある。

今回、*V. vulnificus* 感染症や他の細菌感染を疑い、PMX-DHPを施行して治療したものの救命できなかった劇症型の *Streptococcus pneumoniae* (肺炎球菌) 感染症例と、人工肛門閉鎖後に敗血症性ショックとなり、高エンドトキシン血症に対してPMX-DHPを使用し救命できた

Krebsiella pneumoniae 症例を経験したので報告する。

2. 症例 1

患者: 54歳、女性

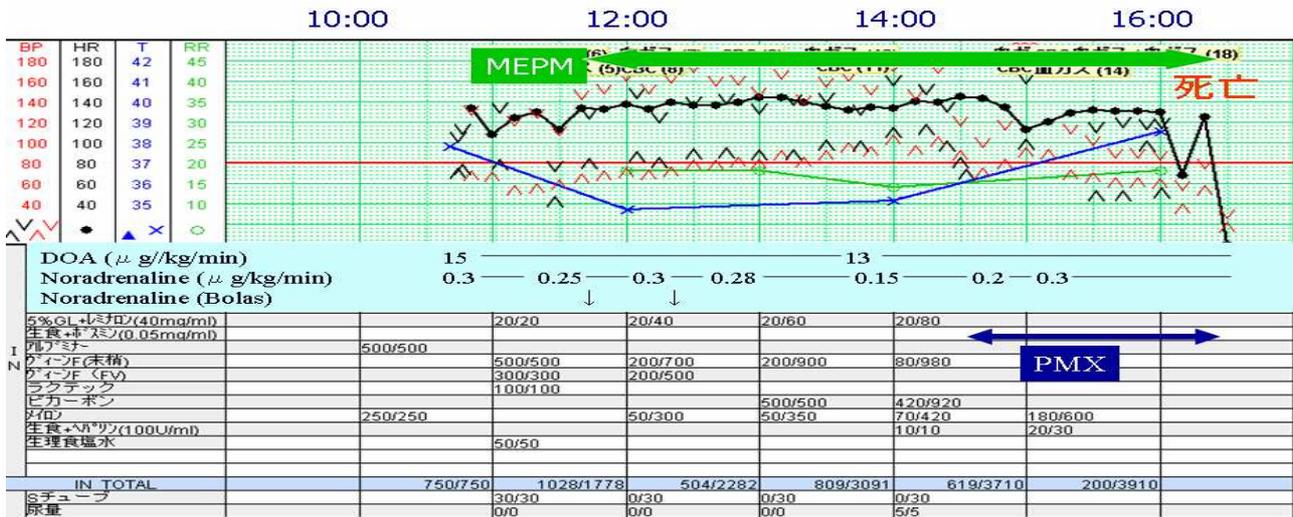
【主訴】意識障害

【現病歴】平成17年1月中旬に悪寒、吐き気・嘔吐が頻回に出現。翌日も症状が改善せず、近医を受診するも症状の改善は認めなかった。2日後の早朝、隣で寝ていた夫が、呼吸が速いのに気づき、声かけを行うも応答がなく救急車にて当院救急外来に搬送された。

【既往歴】2001年1月、急性心筋梗塞にてステント挿入。

【入院時現症】意識JCSIII-300, BP 153/112mmHg, PR 150/min, BT 35.9°C, SpO₂:測定不能。

瞳孔: 右2.5cm, 左散大, 対光反射なし。鼻腔: 暗赤色の排液持続。呼吸音: 右肺野でclackle。腹部: 軽度膨隆、軟、腸蠕動音減弱。皮膚: 前胸部～腹部、四肢末梢を中



症例1経過

心に全身性に紫斑を認めた。

【検査所見】 WBC 5200/μl, RBC 5.24×10⁶/μl, Hb 15.8g/dl, Ht 46.5%, Plt 4.2×10⁴/μl, PT 26.7%, PT-INR 2.00, APTT 47.5%, Fib 183.6mg/dl, FDP-E 9820.4mg/ml, ATIII 23.1% TP 7.3g/dl, Alb 4.2g/dl, AST 319IU/l, ALT 117IU/l, LDH 1178IU/l, ALP 504IU/l, γ-GTP 226IU/l, T-bil 2.2mg/dl, AMY 57IU/l, CK 212IU/l, CK-MB 27IU/l, BUN 39.1mg/dl, Cr 1.85mg/dl, Na 143mEq/l, K 3.7mEq/l, Cl 99mEq/l, Ca 10.1mEq/l, Glu 42mg/dl, CRP 35.97mg/dl, アンモニア 62μg/dl

エンドトキシン1.2pg/ml以下, β-Dグルカン18.0pg/ml、血液ガス (O₂-15l/min リザーバー) : pH 7.153, PaCO₂ 37.4mmHg, PaO₂ 61.3mmHg, HCO₃ 12.6mmol/l, BE -15.9mmol/l

一般細菌培養 (後に判明) : (動静脈血) *Streptococcus pneumoniae* 2+

【入院後の経過】 来院時、低血糖(33mg/dl)を認めたため50%Glucose40mlを点滴静脈注射し、血糖は100mg/dl以上に改善したが、意識レベルの改善は無く、呼吸状態も悪化したため気管内挿管を行った。また、出血症状 (全身紫斑)、臓器障害、FDP上昇、血小板数低下、PT-INR高値にてDICスコア8点であり、DICと診断した。その後、頻脈、血圧低下、CRPの上昇を認めたため敗血症性ショックと診断し、ドパミンを開始した。全身状態管理のため同日10:40にICU入室となった。入室直後、ドパミンのみでは収縮期血圧80mmHg台と昇圧不十分で、さらに血圧が低下したため、ノルアドレナリンを開始した。また、全身の紫斑は増悪傾向にあり四肢末梢から上腕、大腿部まで及ぶようになり、胸腹部の紫斑も全体的に広がっていった。14:50よりPMX-DHPを施行した(後にエンドトキシンは正常範囲内と判明)。また、血清K値が7.0 mEq/lと高値であったため、Glucose-insulin療法を施行し、Ca製剤を投与した。抗生剤はMEPMを開始した。DICに対してはgabexate mesilateを持続静注、ATIII製剤も投与した。

15:30過ぎ、徐々に血圧低下がみられ、高CO₂血症も出現し16:31 永眠された。

【考察】 *S. pneumoniae*は口腔・鼻腔における常在菌であるが、無脾・免疫不全・補体欠乏症の患者や免疫機構の発達が不十分な乳幼児などのハイリスクグループで劇症型感染症(overwhelming postsplenectomy infection:OPSI)が引き起こされることがある。その臨床症状は激烈で、発症後36時間以内で死亡することが多く、その死亡率は50~80%といわれている。

*S. pneumoniae*の病原因子としては、莢膜多糖、細胞壁成分、 pneumolysin, autolysin等が知られている。特に莢膜多糖は炎症細胞による貪食殺菌に対する抵抗性と密接にかかわっている。また、 pneumolysinは菌体内に存在する毒素で、細菌の破壊に伴い細胞外に放出され宿主細胞を障害する。*S. pneumoniae*のペプチドグリカンとタイコ酸は莢膜多糖の主要構成成分であり、生体内において炎症性サイトカイン(TNF-α, IL-1, IL-6)を誘導する。これらサイトカインは局所への炎症細胞遊走、細胞の活性化を増幅するとともに、肝臓におけるCRPなどの産生を誘導する。*S. pneumoniae*では増殖後期に自己融解酵素の活性が増強することが知られており、これにより自らが溶菌しpneumolysin, ペプチドグリカン, タイコ酸などが放出され、強い炎症反応が惹起されると考えられている。

*S. pneumoniae*感染症における治療法は、以前はペニシリン系抗生剤が第一選択であったが、近年ではペニシリン耐性肺炎球菌(PRSP)が問題となっており、臨床分離株の40~50%がペニシリン低感受性・耐性となっていると言われている。今回分離されたのはペニシリン感受性タイプであり、使用した抗生剤は広域スペクトラムのカルバペネム系とPRSPもカバーする選択であった。今回の症例のような劇症型の治療法としては、広域スペクトラム抗生剤の投与に加え、*S. pneumoniae*からの病原因子による全身性炎症反応に対する対症療法を行う以外に有効な治療法は未だ確立されていない。

我々の検索した限りでは、脾摘既往や免疫機構に問題のない健康成人で劇症型を引き起こした症例は、国内では1例の報告²⁾があるのみであり、24時間以内での死亡であった。

【結語】脾摘の既往のない成人に発症した劇症型肺炎球菌性敗血症により死亡した非常に稀な1例を経験した。今回の症例はOPSIに臨床症状や経過が類似していたが、脾摘既往なく、脾機能低下を示唆するような所見も認めていなかった。

3. 症例 2

患者：70歳、男性

【現病歴】平成18年3月直腸低位前方切除術+D2領域リンパ節郭清、横行結腸人工肛門造設術(双孔式)を施行した。術後縫合不全、腸閉塞を認めたが軽快し一旦退院、今回人工肛門閉鎖目的に入院となった。

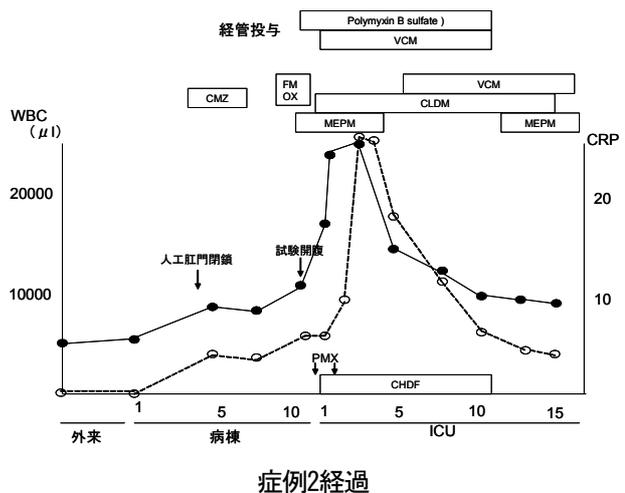
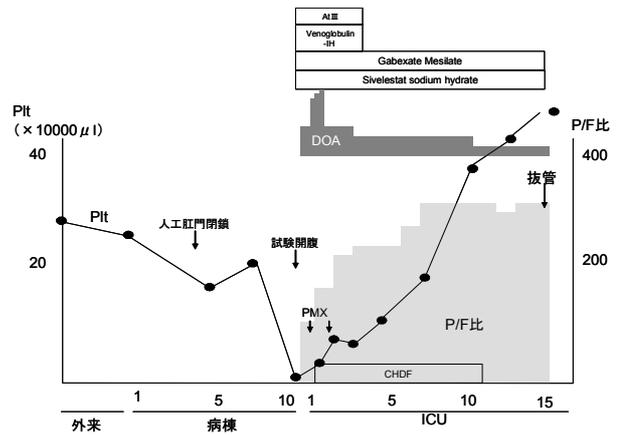
【既往歴】幼少時に虫垂切除、高血圧、脳梗塞

【入院時現症】BP 152/100mmHg, PR 68/min 整, BT 36.2°C

【入院時検査所見】WBC 5100/ μ l, Hb 12.0g/dl, Plt 22.8×10^4 / μ l, TP 7.2g/dl, Alb 4.1g/dl, AST 19.6IU/l, ALT 6IU/l LDH 251IU/l, ChE 325IU/l, ALP 256IU/l, γ -GTP 25IU/l, T-bil 0.5mg/dl, CK 70IU/l, PT 89.8%, APTT 93.5%, BUN 14.7mg/dl, Cr 0.73mg/dl, Na 142mEq/l, K 3.8mEq/l, Cl 107mEq/l, CRP 0.26mg/dl

注腸造影：経肛門的に造影。造影剤の漏れなく狭窄認めず、ストーマ以降の腸管はやや廃用性の萎縮を認めるが通過性は良好であった。

【入院後経過】2006年7月に入院し、術前に人工肛門より肛門側の前処置は行わず、入院4日に人工肛門閉鎖術を行った。術後3日目より水分摂取を開始し、術後5日目より食事を開始した。術後7日目に38°C台の発熱あり、特に腹部所見を認めなかったが、WBC 10,000/ μ l (Neutro 97%), PLT 26×10^4 / μ l, CRP 5.8 mg/dlと炎症所見を認めたため腹部CTを行ったが明らかな炎症のフォーカスは認めず、抗生剤投与にて保存的に経過観察した。しかし、同日ショック状態になり、採血にてPlt 6.4×10^4 / μ lと低下を認めたため、縫合不全、膿瘍などを疑い、緊急開腹手術を行った。しかし、腹腔内には漿液性の腹水を少量認めるのみで明らかな炎症のフォーカスはなかった。術後ICU入室し、全身管理を行ったが低血圧及び尿量低下が持続し、呼吸機能もPaO₂/FIO₂比が118.2と低下していた。APACHE II score 29点、SOFA score 13点であり、全身状態も悪かったためPMX-DHPを2時間施行し、引き続きCHDF (Continuous hemodiafiltration) を開始した。PMX-DHP前のエンドトキシン値は30pg/mlと上昇を認めていた。PMX-DHP施行後、血圧及びPaO₂/FIO₂比が上昇し、全身状態の改善を認めた。またbacterial translocationを疑ったため、胃管よりGFO療法(グルタミン・ファイバ



症例2経過

ー・オリゴ糖投与)を行い、ポリミキシンB、azulene sulfonate sodium・L-glutamine232を投与開始した。またDICの診断の基、gabexate mesilate, ATIIIなどを投与した。翌日には再び血圧が低下し、ドパミンも増量となったため2回目のPMX-DHPを施行した。その結果ドパミンは減量でき、血圧も160mmHg台へと上昇した。また、ショックを呈した際に施行された血液培養から*Krebsiella pneumoniae*が検出された。その後はDIC、呼吸不全の治療を中心に行い、徐々に全身状態の改善がみられ、術後12日目に経腸栄養を開始し、17日目にCHDFより離脱した。呼吸機能も徐々に改善し21日目に抜管。25日目にICU退室となった。

【考察】腸管に存在する常在菌が侵襲によって破綻した腸管粘膜バリアーを通過し、ショック状態となることが1950年代に”transmural migration of intestinal bacteria”として報告された。また細菌だけではなく腸内細菌由来のエンドトキシンや他の産生物質も原因であると考えられるようになり、1990年にmicrobial translocationとして総称することが提唱され³⁾、臨床の場合においてはbacterial translocation (BT)として呼ばれている。

本症例においては人工肛門閉鎖術の術後であったが、この手術では侵襲はそれほど大きくなく、通常の術後管理を行い、出血やアレルギーなどがなければショック状

態になるとは考えにくい。そこで感染によるものを考えたが、通常消化器外科手術後では縫合不全、肺炎などの際に起こりやすく、本症例もまずいずれかの感染フォーカスが存在する敗血症性ショックを想定した。しかし、画像診断や試験開腹まで行ったにもかかわらず炎症のフォーカスは不明であった。このためBTによるエンドトキシンショックを疑い、血液培養から*K. pneumoniae*が検出され、消化管の常在菌かつ弱毒菌である莢膜構造をもつグラム陰性桿菌による敗血症と考えた。

本症例は術前の全身状態は悪くなく、生体防御能は低下していないと考えられ、絶食、手術などによる腸内環境の変化、腸粘膜上皮の防御機能低下などにより⁴⁾ BTが引き起こされたと考えられた。実際術後5日目より食事開始し、その2日目に敗血症性ショックを発症している。この時の血中エンドトキシン濃度は高く、これは腸管粘膜を通り、血液中に進入した細菌から発生しただけではなく、腸内で発生したエンドトキシンが体内へ流入したのも関係しているとも考えられた。このエンドトキシンによりサイトカインなどの各種メディエーターが産生され、また単球・マクロファージからAnandamide (ANA)、血小板から2-arachidonylglycerol (2-AG)などが放出され、SIRS⁵⁾、sepsis^{6) 7)}となり、血管内皮細胞障害⁸⁾などをきたしDICなどの病態を引き起こしたと考えられる。

近年、重症敗血症に対して国際ガイドライン⁹⁾が発表され、治療のコンセンサスが固まりつつあるが、未だ管理に関しては難しい点も多く救命率は十分とはいえない。BTによる敗血症の治療としては適切な経静脈的抗生剤の投与、全身管理、経腸・経口栄養やSelective digestive decontamination (SDD)などがあり、全身管理のひとつとして高エンドトキシンに対するPMX-DHPが有効と報告され始めた。PMX-DHPはpolymyxin Bを固定したfiberを充填した吸着カラムの中に全血をかん流させることによりエンドトキシンなどを吸着除去する血液浄化法で、近年になり内因性カンナビノイドの吸着なども報告されており、今後は我々もそれらの測定を行っていく予定である。同時に、PMX-DHPは重症例や感染がコントロールされていない症例などでは効果が一時的または無効との報告もあるものの、血圧を上昇させるなどの効果を持ち、その予後を改善させるなどの有用性が認められ始め、我々も敗血症に対しては積極的に使用していく方針である。

【結語】人工肛門閉鎖後にBTによると考えられる敗血症ショックを来した症例を経験した。敗血症性ショックに対してPMX-DHPを含めた全身管理を行い救命できた。

4. まとめ

重篤な敗血症性ショックを呈しPMX-DHPを含む集中治療を実施したものの救命できなかった症例と、人工肛門閉鎖後に敗血症性ショックとなり高エンドトキシン血症に対してPMX-DHPを使用して救命できた症例を経験した。今後は*Vibrio vulnificus*感染症の死因のひとつの原因である敗血症性ショックに対する治療法の確立のためにも、他の感染症による敗血症性ショックの治療も併せて行いながら、その病態・治療法を研究していく予定である。

参考文献

- 1) 三溝慎次、中島幹夫、前田祥範、吉田昌人、十時忠秀. *Vibrio vulnificus*による壊死性筋膜炎11症例の検討. *ICUとCCU(0389-1194)*, 2001;857-861.
- 2) 伊藤裕二. 摘脾の既往のない成人に発症した劇症型肺炎球菌感染症の1例. *内科(0022-1961)* 2004; 94 : 189-191
- 3) Alexander JW, Boyce ST, Babcock GF, Gianotti L, Peck MD, Dunn DL, Pyles T, Childress CP, Ash SK. The process of microbial translocation. *Ann Surg.* 1990;212:496-510;
- 4) Berg RD. Bacterial translocation from the gastrointestinal tract. *J Med.* 1992;23:217-44.
- 5) Gando S, Kameue T, Matsuda N, Hayakawa M, Morimoto Y, Ishitani T, Kemmotsu O. Imbalances between the levels of tissue factor and tissue factor pathway inhibitor in ARDS patients. *Thromb Res.* 2003;109 :119-24.
- 6) American College of Chest Physicians/Society of Critical Care Medicine Consensus Conference: definitions for sepsis and organ failure and guidelines for the use of innovative therapies in sepsis. *Crit Care Med.* 1992 ;20 :864-74.
- 7) Wheeler AP, Bernard GR. Treating patients with severe sepsis. *N Engl J Med.* 1999;340:207-14.
- 8) Kushimoto S, Okajima K, Uchiba M, Murakami K, Okabe H, Takatsuki K. Pulmonary vascular injury induced by hemorrhagic shock is mediated by P-selectin in rats. *Thromb Res.* 1996 ;82 : 97-106.
- 9) Dellinger RP, Carlet JM, Masur H, Gerlach H, Calandra T, Cohen J, Gea-Banacloche J, Keh D, Marshall JC, Parker MM, Ramsay G, Zimmerman JL, Vincent JL, Levy MM; Surviving Sepsis Campaign Management Guidelines Committee. Surviving Sepsis Campaign guidelines for management of severe sepsis and septic shock. *Crit Care Med.* 2004 ;32 : 858-73.

(2007. 3. 19受付)

環境及びヒト由来ビブリオ・バルニフィカスの 遺伝子学的相同性の検討

GENETIC HOMOGENY STUDIES ON ENVIRONMENT-DERIVED AND CLINICAL ISOLATE OF VIBRIO *VULNIFICUS*

高柳恵¹・中島由佳理²・草場耕二³・永沢善三⁴・大石浩隆⁵・中島幹夫⁶
Megumi TAKAYANAGI, Yukari NAKASHIMA, Kouji KUSABA,
Zenzo NAGASAWA, Hirotaka OISHI and Mikio NAKASHIMA

- | | | |
|---|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 佐賀大学医学部臨床検査技師 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 2 | 佐賀大学医学部臨床検査技師 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 3 | 佐賀大学医学部主任臨床検査技師 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 4 | 医博 佐賀大学医学部副臨床検査技師長 検査部感染制御室 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 5 | 医博 佐賀大学助教授 有明海総合研究プロジェクト | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |
| 6 | 医博 佐賀大学教授 医学部麻酔・蘇生学 | (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1) |

Genetic homology was analyzed by modified pulsed-field gel electrophoresis (PFGE) on the 22 strains of *Vibrio vulnificus* strains isolated from the patients of those infections, the 24 strains from seawater, and fishery products collected from around Ariake Sea. To obtain clear results, we added 200 μ M thiourea to the agarose gel and running buffer. The result of UPGMA (unweight pair group method using arithmetic averages) based on PFGE pattern showed that close similarity was not identified among environment-derived strains. On the other hand, in examination among clinical isolates, several strains showed high resemblance rate, and it was suggested that there was some relativity about these isolates and the pathogenicity. In addition, there is a group showing high analogy between an environmental-derived and clinical isolates, and both origins may be associated closely.

Our results showed that there were a lot of clusters in the classification of genotype in *V. vulnificus* strains.

Key Words : *Vibrio vulnificus*, Pulse-field gel electrophoresis (PFGE), UPGMA, Thiourea

1. はじめに

海水中に生息する *Vibrio vulnificus* 菌の感染経路は、生の魚介類の摂食による経口感染型と、創部への海水曝露による創傷感染型の2種類があり、我が国においては生の魚介類摂食を好む食文化を反映してか、約7割が経口感染型である¹⁾。しかし世界的に見ても、未だ原因食材からの検出菌と患者からの検出菌が同一であったと証明された例は無いのが現状である。我々はこの問題を解決するために、昨年度構築した患者発生通報ネットワークを通じて *V. vulnificus* 患者が発生した場合には、発生状況の聞き取り調査と同時に原因食材の収集を行っているが²⁾、原因食材が生魚介類であるため、我々への通報時(摂食から数日後)には全例において既に消費ある

いは廃棄されていた。しかしながら、原因-因果関係を証明する技術、すなわち菌の相同性を確認する技術を確認しておく事は、本菌感染症の感染ルートを確定する上で非常に重要な課題である。

1984年に報告されたパルスフィールドゲル電気泳動(pulsed-field gel electrophoresis : PFGE)法³⁾は、感染原因菌を型別し、アウトブレイクの有無、感染ルートや感染源の特定など幅広い領域で貢献している。実際、当院においても、メチシリン耐性ブドウ球菌感染症による院内感染等に応用し、原因菌の相同性評価において信頼できる成績を収めている。

しかし我々の以前の研究結果では、従来のPFGE法では *Vibrio vulnificus* 252株中38株でバンドがスメア状になる泳動像を認めたため、スメア状の泳動像を解消する目的で、手技・制限酵素の再確認およびホルマリンの蛋白

変性作用を利用した処理法⁴⁾を検討したが、同様なスメア状の泳動像を再び認めた。そこで、Romling, U⁵⁾らの文献を参考にチオウレアを添加して泳動を試みた結果、良好なPFGEの解析結果が得られた（【参考】参照）。今回我々はこの技術を応用し、患者由来菌株と環境由来菌株間での遺伝子学的相同性について解析を行った。

2. 材料および方法

(1) 対象菌株

1995年～2002年において*V. vulnificus*感染患者22人から検出された22株、及び佐賀近郊の海水・魚介類より検出された*V. vulnificus*24株（表1）の計46株を対象とした。

(2) 菌同定方法

VITEK2[®]（日本ビオメリュー）およびバイオテスト1号‘栄研’[®]（栄研化学）を使用し、それぞれの納書に進じ菌種の同定を行った。さらに食塩耐性能試験で、3%NaCl加ペプトン水のみで発育した菌株を*V. vulnificus*と同定した。

(3) 疫学解析

V. vulnificus のPFGEにはGene Path Kit Group2[®]（Bio-Rad）の試薬を使用し、泳動はGene Path Strain Typing System（Bio-Rad）のProgram “No22”で行った。尚、制限酵素はNot I（Biorad）を用いた。

3. 結果と考察

(1) 電気泳動像

最終濃度200 μMのチオウレアで処理したPFGE画像を図1（ヒト由来株）及び図2（環境由来株）に示す。スメア状の泳動像もなく明瞭なバンドが認められた。DNAの泳動パターンの分子量50～500kbpの間に9本～18本のバンドが確認された（C; control, L; lambda ladder）。

(2) 系統樹解析

図3にUPGMA(unweight pair group method using arithmetic averages)法によるクラスター解析結果を示す。ヒト由来株同士、あるいは環境-ヒト由来株間で類似度が100%を示す株が認められた。

表1. 環境由来株採取場所及び材料

番号	地域	材料
1	大川	海水
2	浜崎	海水
3	芦刈	カキ
4	芦刈	海水
5	大川	カキ
6	大川	海水
7	大川	海水
8	鹿島	海水
9	芦刈	海水
10	浜崎	海水
11	松浦川	カキ
12	鹿島	海水
13	大川	海水
14	空港	海水
15	広江	カキ
16	広江	カキ
17	鹿島	カキ
18	川崎	カキ
19	川崎	カキ
20	有明	カキ
21	空港	海水
22	大川	カキ
23	有明	海水
24	呼子	巻貝

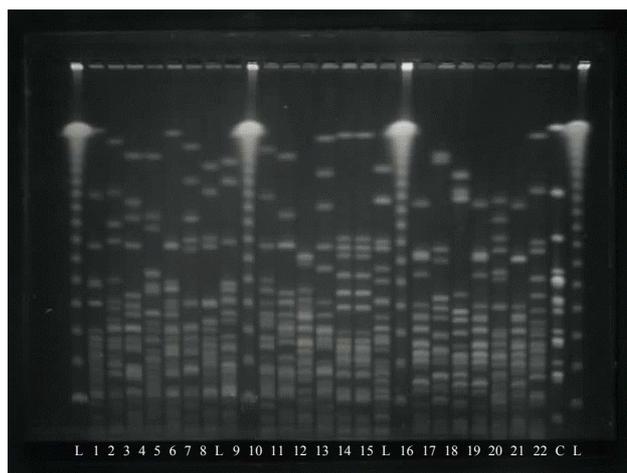


図1. ヒト由来株電気泳動像

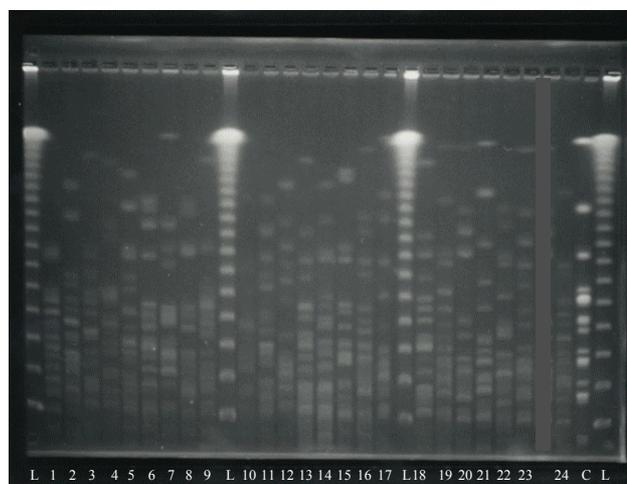


図2. 環境由来株電気泳動像

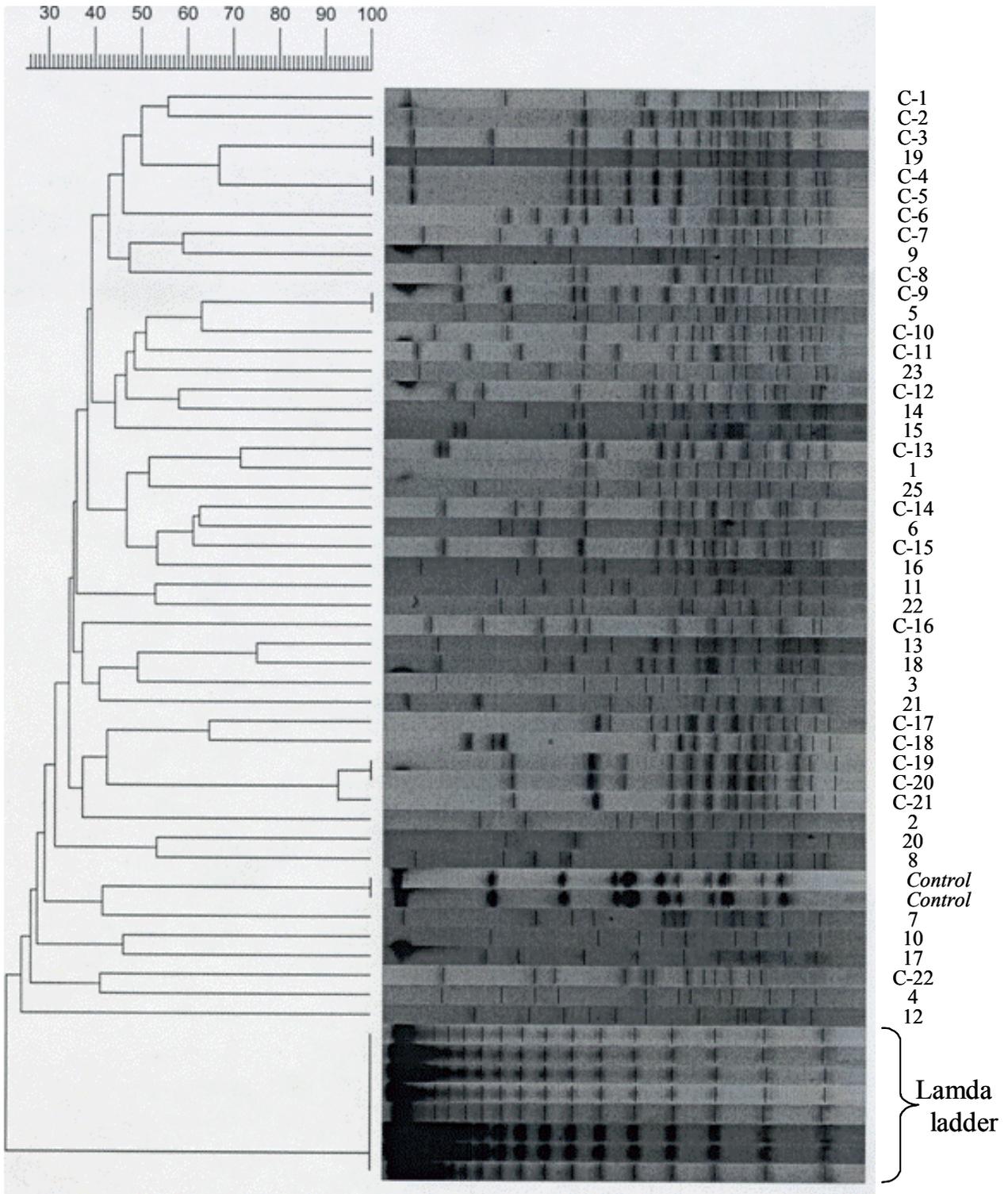


図3. 環境及びヒト由来ビブリオ・バルニフィカス株の系統樹及びバンドパターン。
C1~C22 ; ヒト由来株、1~24 ; 環境由来株、Control : コントロール (E-coli)

*V. vulnificus*の感染源は、すべて魚介類および海水で、感染症は免疫機能の低下や慢性肝疾患、遊離鉄が増加した患者で起こり易い⁶⁾。*V. vulnificus*の感染病像には、原発性敗血症型と創傷からの軟組織感染とがあるが、わが国では患者の約90%は敗血症型で、その多くは24時間以内にショック状態に陥り、極めて予後が悪い感染症である⁷⁾。そのため、本菌のヒトへの感染経路を解明することは予防医学において極めて意義が高いと言える。

そこで、特定地域の海水や特定の魚介類と感染患者から検出された*V. vulnificus*の間で高い遺伝子学的同一性が確認されれば、その原因となる海水や魚介類を遮断することで、致死率の極めて高い*V. vulnificus*の感染を予防できるものと考えられる。

今回の*V. vulnificus*のPGEF法の成績を基にしたUPGMA法において、環境株同士間には100%の類似性を示す株は認められず、菌株は多数のクラスターを呈していることがわかった。このことは、環境株において同一採取部位、同一試料（海水、カキ）でも多種類のクローンがあるということになる。一方、ヒト由来株同士の検討においては、高い類似率を示したものが2組（C-4～C-5、C-19～C-20～C-21）あり、これらの株とその病原性について、何らかの関連がある可能性が示唆された。また、環境株とヒト由来株で高い類似性を示す組があり（C-3～19、C-9～5）両由来株が密接に関連している可能性がある。

今回の研究から、*V. vulnificus*のO血清型分類では約20弱に分類されるが、我々の研究結果から遺伝子型による分類では多数のクラスターを示すことが明らかとなった。

謝辞：細菌学的検討にご協力頂いた麻酔・蘇生学教室森田よう子氏に深謝する。

【参 考】

チオウレア処理の有用性が確認されたPFGE法の結果について（高柳ら：医学検査Vol.54, No9, 2005, pp1207-1211）

a) ホルマリン処理

*V. vulnificus*の菌体内に存在するヌクレアーゼによりDNAの損傷を受けることが原因と疑い、ヌクレアーゼを失活させるためにホルマリンの蛋白変性作用を利用してPFGEを行った。しかし、2時間のホルマリン処理においてもスメア状の泳動像は出現したため、この原因は否定された。

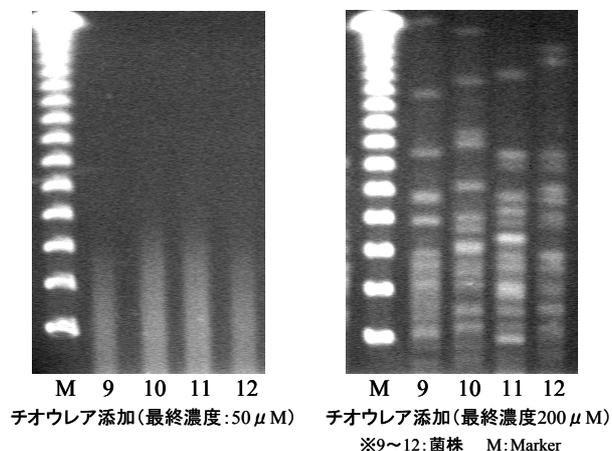
b) 制限酵素の再検討

手技・制限酵素による原因を考え、検査担当者および制限酵素を代えてPFGEの解析を数回試みたが、スメア状の泳動像は同様に出現した。

c) チオウレア添加の検討

泳動時のゲルおよび緩衝液に最終濃度が50 μMに

なるようにチオウレアを加えた。その結果、スメアを呈した38株中32株（84%）でスメア状の泳動像は解消されたが、残りの6株（16%）においては、この現象は改善されなかった。そこで、チオウレアの最終濃度を200 μMに調整し処理を行った結果、スメア状の泳動像は改善され明瞭なバンドの出現が認められた。



チオウレア添加濃度の違いによる検討

参考文献

- 1) Oishi H, Ura Y, Mitsumizo S, Nakashima M: [A collective review of *Vibrio vulnificus* infection in Japan]. *Kansenshogaku Zasshi* 2006;80(6):680-9.
- 2) 中島幹夫、大石浩隆、荒木和邦、三溝慎次: わが国における*Vibrio vulnificus*感染症の発生動向と有明海沿岸地域の状況. 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 2005;第1巻:55-60.
- 3) Schwartz DC, Cantor CR: Separation of yeast chromosome-sized DNAs by pulsed field gradient gel electrophoresis. *Cell* 1984;37(1):67-75.
- 4) Ishii Y, Alba J, Kimura S, Nakashima K, Abe Y, Yamaguchi K: Rapid pulsed-field gel electrophoresis technique for determination of genetic diversity of *Serratia marcescens*. *J Infect Chemother* 2002;8(4):368-70.
- 5) Romling U, Tummeler B: Achieving 100% typeability of *Pseudomonas aeruginosa* by pulsed-field gel electrophoresis. *J Clin Microbiol* 2000;38(1):464-5.
- 6) Wright AC, Simpson LM, Oliver JD: Role of iron in the pathogenesis of *Vibrio vulnificus* infections. *Infect Immun* 1981;34(2):503-7.
- 7) 坂崎利一: *Vibrio vulnificus*感染症. 日本臨床微生物学雑誌 1999;9:133-6.

(2007. 3. 19受付)

地域文化・経済研究部門

Research Division of REGIONAL CULTURE and ECONOMY

有明海・諫早湾に関する総合的データベースの構築と 新しい社会的決定システムに関する研究(2)

CONSTRUCTION OF DATA-BASE FOR ARIAKE SEA AND ISAHAYA BAY,
AND RESEARCH ON NEW SOCIAL DECISION-MAKING SYSTEM (2)

榎澤秀木¹・池田智子²

Hideki KASHIZAWA, Satoko IKEDA

¹法修 佐賀大学教授 経済学部法政策講座 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²佐賀大学助手 経済学部地域経済研究センター (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

We aim at constructing data-base for Ariake sea and Isahaya reclamation in this project. The data-base will contain the articles of local and national newspapers, official documents in the national and local governments, some writing in the trial and records of the Diet. In 2005, we researched the relevant articles from 1952 to 2005 in Ssga Sinbun (Saga local newspaper). We found about 5300 articles in it.

Saga Sinbun has been interested in Isahaya reclamation continually as compared with Nikkei Sinbun (Japanese economic newspaper), but we wondered that it didn't report so much in 1982 and 1989, the turning points in the Isahaya reclamation.

We have not analyzed the content of articles of Saga Sinbun, but the quantity. We have to do quality analysis in 2007.

Key Words : Ariake sea, Isahaya reclamation, Saga Shinbun (Saga local newspaper), Asahi Shinbun, quantity analysis

1. 今年度の作業

経済学部グループの今年度の作業は、以下の通りである。1952年から2005年までの佐賀新聞の有明海・諫早湾関連記事をデジタル化し、PDFファイルにした。朝日新聞の同記事を収集した。国会の関連する議事録を、中途まで検索・収集した。

以上の作業について、若干敷衍して説明する。

まず、佐賀新聞の関連記事についてであるが、2005年度に同記事の検索を終了していた。1994年以降の佐賀新聞記事は、ウェブ上で検索可能であるが、それ以前については過去の新聞記事そのものにあたって検索するしか方法がない。そのため、学生アルバイトを雇って、佐賀大学図書館に保存されている佐賀新聞をひとつひとつめくらせ、「諫早湾干拓」「有明海異変」に関する記事を検索させる作業を行った。1952年以降の新聞記事となっているのは、言うまでもなく、長崎県の大干拓構想が1952年に発表されたからである。今年度は、それら検索した記事を、コピーし、OCRで読み取る作業を行った。

次に、朝日新聞の同記事の収集であるが、これも1980年頃以降の記事は、ウェブ上で検索可能であるが、それ

以前の記事については実際の新聞記事に当たって検索するしか方法がない。当初我々は、佐賀県立図書館に向いて検索作業を行おうとしたが、同図書館は、朝日新聞の佐賀版しか保存していない上、その保存された佐賀版についても、検索は可能だが、資料汚損のおそれがあるためコピーは許可できないということであった。

次に朝日新聞全体の記事を保存している佐世保図書館をお願いして、記事の検索作業を行った。同図書館には、完璧な朝日新聞記事が保存されていた。数日間にわたって検索作業を行ったが、しかし作業ははかどらず、またコピーを行う際に不都合が生じたため、同図書館での検索作業を中止せざるを得なかった。

そのため、最終的には、朝日新聞西部本社に保存されている新聞記事を検索するつもりで、同社に連絡を取った。すると、思いがけず関連記事がすでに切り抜かれ、保存されていることが分かった。こうして、1月に同社にコピー機を持ち込んで、集中的に関連記事をコピーすることができた。

最後に国会議事録の検索・収集であるが、これはウェブ上のデータベースを使って行っている。

今年度は、以上の作業に時間を取られ、得られたデー

タの分析にはほとんど着手できていないが、現時点での暫定的な成果を以下に示す。

2. 佐賀新聞の記事数

表1は、1952年から2005年までの佐賀新聞の記事数である。

表1 佐賀新聞における
関連記事数の変化

年	件数
1952	23
1953	20
1954	49
1955	18
1956	23
1957	14
1958	20
1959	19
1960	15
1961	14
1962	13
1963	11
1964	15
1965	9
1966	47
1967	48
1968	46
1969	36
1970	63
1971	29
1972	21
1973	28
1974	25
1975	17
1976	21
1977	52
1978	37
1979	47
1980	28
1981	27
1982	17
1983	31
1984	40
1985	57
1986	81
1987	56

1988	159
1989	42
1990	84
1991	31
1992	23
1993	43
1994	268
1995	232
1996	179
1997	237
1998	413
1999	382
2000	254
2001	674
2002	415
2003	214
2004	297
2005	233

表一について若干、付言する。

1994年以降の記事数が、それ以前と比べて格段に多いのは、94年以降の記事検索については、佐賀新聞社ホームページから利用可能な記事検索システムを使って「諫早湾」や「有明海」という言葉で検索を行っているため、本研究には無関係の記事まで網羅的に検索されたことによると推定される。今後、94年以降の記事については、実際の記事を探し出してその内容が本研究にそうものであるかどうかを確認しなければならない。確認の結果、記事数が減ることが予想される。

他方、1993年以前の記事は、バイト学生の目視による記事確認であるので、本研究に無関係な記事は排除されていると思われるが、その反面、関係ある記事が検出されていない可能性もある。そのため、今後、補遺作業を行わなければならない

3. 他新聞記事数と佐賀新聞記事数の比較

次に、他紙の記事数との比較を試行的に行う。比較対象に用いるのは、一昨年度検索を試みた日経新聞である。日経新聞で検索を試みた理由は、1)ウェブ上のデータベースで最も古くにさかのぼって検索ができること、2)その新聞の性格上、諫早湾や有明海についてのキャンペーンが張られる可能性が少なく、いわば中立的な全国的関心度が推定できるからである。

表1と2の比較から、暫定的に次のことが言える。

第一に、全国紙の日経新聞と比べて、地元紙である佐賀新聞の関心が相対的に高く、持続していることである。このことは当然の結果といってよい。

表2 日経新聞における関連記事数の変化

年	合計	九州版	西部版	全国版	他地域版	備考
1976	5	4	0	1	0	
1977	6	6	0	0	0	
1978	3	3	0	0	0	
1979	0	0	0	0	0	
1980	9	6	3	0	0	
1981	9	7	1	1	0	
1982	13	7	6	0	0	12/30 防災へ変更
1983	25	17	7	1	0	
1984	20	17	3	0	0	
1985	12	6	6	0	0	
1986	5	4	0	1	0	
1987	9	3	5	0	1	
1988	4	2	1	1	0	
1989	7	2	2	3	0	11/08干拓起工式
1990	2	1	1	0	0	
1991	0	0	0	0	0	
1992	4	2	0	1	1	
1993	7	1	3	1	2	
1994	6	1	4	1	0	
1995	4	3	0	0	1	
1996	16	3	5	7	1	
1997	162	4	47	106	5	04/14キロチン
1998	54	6	14	22	12	
1999	25	1	10	11	3	
2000	27	2	9	15	1	
2001	292	43	142	99	8	1月/1不作判明
2002	161	15	101	43	2	
2003	62	1	38	19	4	
2004	79	5	52	20	2	

しかし、第二に、佐賀新聞も、諫早湾干拓の目的が防災に変更された82年には、記事数17件であり、日経新聞の13件とあまり差はない。干拓の目的が防災に変更された、この82年が、干拓事業そのものを中止させる大きな転換期であったことを考えると、佐賀新聞の記事数の少なさに驚かされる。

また第三に、干拓工事着工の1989年の記事数については、佐賀新聞42件、日経新聞7件と差があるが、佐賀新聞の89年前後の記事数と比べて突出しているわけではない。むしろ88年の159件が突出して多い。

これは、88年までに佐賀県内漁協が計画に同意したために、それまでは関心が高かったが、実際の工事が進められるようになると、むしろ関心が低下したことを示しているのではないかと考えられる。いずれにしても、今年度は記事数の分析しかおこなえなかったため、今後、記事の内容に踏み込んだ分析をする必要がある。

4. 国会議事録の検索

国会議事録については、ウェブ上のデータベースを用いて関連議事を今なお検索中であるが、現時点で得られた検索結果を示す。表3は、「諫早湾」と「干拓」をクロスして検索した結果である。

表3 国会における議事回数（「諫早湾」と「干拓」）

1952年	0	1979年	1
1953年	0	1980年	0
1954年	0	1981年	0
1955年	0	1982年	2
1956年	0	1983年	3
1957年	0	1984年	1
1958年	0	1985年	0
1959年	0	1986年	0
1960年	0	1987年	0
1961年	0	1988年	0
1962年	0	1989年	0
1963年	0	1990年	0
1964年	1	1991年	1
1965年	0	1992年	0
1966年	0	1993年	0
1967年	0	1994年	0
1968年	0	1995年	0
1969年	0	1996年	0
1970年	1	1997年	10
1971年	0	1998年	4
1972年	0	1999年	5
1973年	0	2000年	10
1974年	0	2001年	49
1975年	0	2002年	39
1976年	0	2003年	21
1977年	2	2004年	16
1978年	0	2005年	10

表3は、まだ暫定的な検索結果であり、議事の内容に踏み込んだ分析はまだできていないが、それでもこの表から直ちに気づかされることがある。すなわち行政を監視すべき国会の「怠慢」である。

日本最大の干潟を干拓する工事であり、「最後の大型公共事業」とも言われた諫早湾干拓事業に関して、国会の議事はあまりに少なすぎるのではなからうか。例えば、干拓計画が長崎県南部総合開発計画から諫早湾防災計画に転換されるという、いわば大きな転換点であった1982年でさえ、議事回数はわずかに2回しかない。また、1989年に干拓工事に着工して、潮受け堤防が締め切られる前までの8年間には、わずかに1回しか国会で話題となっていない。それが、1997年潮受け堤防締め切り(いわゆるギロチン)後は、一転して大きく増えている。

確かに、国会は個々の公共事業について容易に審議できる権能を与えられていない。いわゆる公共事業の箇所付けについては、国会の承認はおろか、審議も必要とされていない。そのため、政府は、個々の公共事業についての情報さえも国会にあまり提出しないようである。しかし、だからといって、国会が個々の公共事業について積極的に審議できないわけではない。諫早湾干拓事業については、国会はあまりにも怠慢すぎたのではないか、と思われる。

もっとも、以上のような「国会非難」は、やや酷な面があることも確かである。先の日経新聞全国版の統計数値に見られるように、諫早湾干拓事業については、国会のみならず、マスコミもほとんど着目していなかったか

らである。

このように、諫早湾干拓事業は、本来議論されるべき時に、議論されるべきことが議論されないという、アジェンダ・セッティングのズレを端的に示す例ではないかと思われる。もちろん、そのことを断定的に言うには、もっと多くのマスコミを調査しなければならないし、また国会議事録もより細かに調べなければならない。さらには、新聞記事や国会議事録の中身に立ち入って、そのことを検証しなければならない。それらの作業を行うことが、今後の課題である。

謝辞：朝日新聞西部本社には、同社で切り抜き・保存されていた関連記事のコピーを快く許して頂いた。心より感謝申し上げます。また、佐賀新聞社には、本プロジェクトで抽出した佐賀新聞記事をネット上に公開することについて、ご快諾をいただいた。これについても、記して謝意を表したい。

(2007.3.17)

佐賀県有明海沿岸域におけるのり養殖集落の性格 —川副町南川副集落を事例に—

FIELD SURVEYS ON CHARACTERISTICS OF SEAWEED GROWERS SETTLEMENTS IN KAWASOE, SAGA JAPAN

山下宗利

Munetoshi YAMASHITA

理博 佐賀大学教授 佐賀大学文化教育学部地域・生活文化講座 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

A series of bad harvest of seaweed, aging of growers, and difficulties of successors have caused serious problems along the gulf area of Ariake Sea recently. A cooperation system between seaweed growers is one of answers for solving these issues. The system, however, has not been popular in Kawasoe Town, at the northeastern corner of the Ariake Sea. Because the area near the Chikugo River is the best place for seaweed aquafarming. This purpose of this study is to clarify the process of seaweed growers in Kawasoe, which is the most famous town for seaweed growers, Saga Prefecture in Japan. Some of characteristics of seaweed growers settlements are also made clear by field surveys. Most of the growers are full-time and are concentrated together in groups in the settlements. Now the cooperation system between seaweed growers is penetrating among growers even in Kawasoe settlements.

Key Words: Ariake Sea, seaweed grower, Kawasoe, cooperation system

1. はじめに

2000年に発生したノリの色落ち被害を契機として有明海沿岸域の持続可能な漁業経営の構築を目指してさまざまな調査・分析や提言、対策がなされてきた。またわが国の漁業全般を取り巻く環境変化、漁業従事者の高齢化や後継者不足といった問題が深刻さを増し、佐賀県有明海沿岸域においてもこれらは看過できない緊急を要する課題と認識されている。持続可能な社会を築くために有明海ではどのような漁業活動が可能で、また沿岸の漁業集落に対してどのような対策がなされるべきかを解明することが重要な課題として横たわっている。

本報告は、のり養殖業が盛んな漁業集落において、いかなる漁業経営がなされ、また関連の深い農業といかなるかわり合いを持ちながら、維持・発展してきたのかを検討することを目的とした。事例集落として佐賀県川副町南川副集落を取り上げ、この地域におけるのり養殖経営を漁業集落という視点から分析する方法を採った。すなわち現地調査に基づいたのり養殖集落の性格を明らかにしたい。

有明海におけるのりのり養殖の協業化の進展に関してはさまざまな分析がなされてきた(島:2002¹⁾、片岡:2003²⁾、山下:2005³⁾)。のり養殖協業体の基本は各構成世帯から均等の労働力を供出することにより、これによって経営規模の拡大と労働軽減およびコスト削減を図ろうとした。しかしながら職場を共にする人間関係が重視され、とりわけ均等な労働力構成と配置が重要な課題とされた。またのり養殖規模の目標や設備内容、加工場用地の確保(騒音・排水問題)、設備(漁船等の海上施設と高額な乾燥機)、そして資産の整理なども見逃すことのできない問題である。さらにのり養殖経営体の収益性の差が協業化の進展に地域差を生み出し、有明海の中でも比較的小規模経営が主流を占め、収益性の劣る西部地区において早くから協業化が進展した。これに対して、のり養殖に特化した東部の川副町では個々の漁家によるのり生産が引き続きなされ、協業化の進展は遅れていた。しかしながらのり養殖を取り巻く環境の変化により、川副町においても協業化への途を歩まざるを得ない状況となっている。

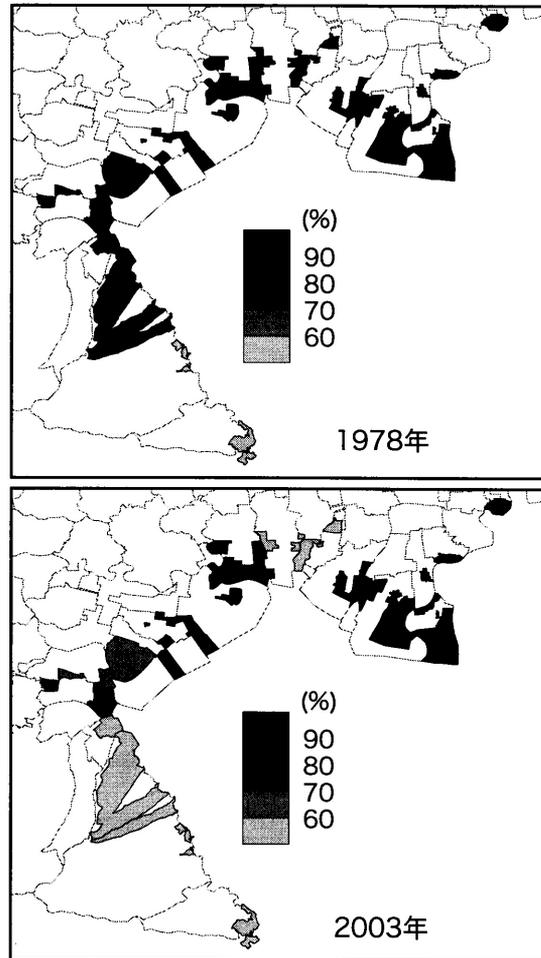
分析の具体的な手順としては、漁業センサスの市町村別統計や漁業集落カードを用いて、佐賀県有明海沿岸域におけるのり養殖の特色を確認する。そして事例集落においてどのようにしてのり養殖経営が成立しているかを明らかにしたい。

2. 有明海沿岸域におけるのり養殖の分布

ここでは漁業センサス結果を用いて有明海区に属する14市町における経営体数およびのり類経営体数の変化を検討し、川副町ののり養殖の位置づけを行いたい。対象とする指標は、センサスの「経営体数」と「主とする漁業種別経営体数（のり類養殖）」である。第1図は、漁業経営体総数に占めるのり養殖を主とする経営体数の比率（以下、「主業のり養殖経営体率」とする）を示したものである。1978年は14市町別の比率を、2003年は23の漁業地区別比率を用いている。

1978年当時ののり養殖は計2,879漁業経営体のうち81.8%に当たる2,356経営体がのり養殖を行っていた。千代田町（現・神崎市）（52経営体）と塩田町（現・嬉野市）（1経営体）では全漁家がのり養殖を行い、川副町においても711漁業経営体のうち702経営体がのり養殖を営み、主業のり養殖経営体率は98.7%といった高い比率であった。これは佐賀県有明海東部・中部地区の諸富町（現・佐賀市）、東与賀町、佐賀市においても9割以上を示していた。しかし西部地区の白石町や有明町（現・白石町）、鹿島市では主業のり養殖経営体率は80%代に低下し、南部の太良町では22%と他の市町に比して著しく低かった。これはのり養殖よりも刺網や採貝漁業が太良町を中心に盛んであったことによる。

2003年になると、主業のり養殖経営体率に地域差が生じている。川副町全域における主業のり養殖経営体率は93.4%と依然として高く、大詫間と早津江の漁業地区ではすべての漁家がのり養殖を漁業の中核に据えている。しかしながら佐賀市の主業のり養殖経営体率は43.8%に、また久保田町のそれは33.3%にそれぞれ低下し、とりわけ中部地区および西部地区におけるのり養殖の位置づけが低下している。この結果、有明海海区全域における主業のり養殖経営体率も67.6%となった。このことから川副町を中心とする東部地区が現在においてものり養殖の性格の強い地域であり、中部



第1図 漁業地区別主業のり養殖経営体率の変化
資料：漁業センサス

と西部地区におけるのり養殖の衰退がわずかながら進んでいるといえる。

3. 川副町におけるのり養殖への特化

上述のとおり川副町は佐賀県有明海沿岸域の中でも最ものり養殖が進展した地域である。川副町を事例としてのり養殖漁家の経営体の性格を分析したい。第1表は川副町におけるのり養殖経営体数の推移と専業・兼業別漁業経営体数を示したもの

第1表 川副町におけるけ副町にお数川推移

	1963	1993	1993	1993
1 9 6 3 体	133	691	131	391
1 9 6 3 体	1	1	3	19
1 9 6 3 6 3 体	1	991	199	393
1 9 6 3 3 漁9 1 み)	111	1	111	199
1 1 6 3 9 6 3 3 漁9 が主)	311	1	199	169
1 1 6 3 9 6 3 3 漁9 が主)	19	1	9	19
1 9 6 漁9 漁9 サミ 11 6 3 体 漁9 サ				

第2表 川副町の漁業集落における漁業の生産構造(1998年)

漁業地区	漁業集落	漁業経営体数				後継者なし の漁業経 営体数	漁業就 業者数 合計	65歳以上の漁業就業者数			漁業世帯当 りの漁業就 業者数(人)
		合計	専業	第1種 兼業	第2種 兼業			合計 (人)	男	女	
大詫間	大8区	8	6	2	0	6	19	0	0	0	2.4
	大10区	17	11	6	0	3	54	6	4	2	3.2
	大4区	54	28	26	0	17	160	21	20	1	2.8
早津江	早津江津	8	7	1	0	5	21	4	4	0	2.1
南川副	南5区	16	7	9	0	8	45	1	1	0	2.8
	南6区東	30	9	21	0	18	77	7	6	1	2.6
	南6区西	25	17	8	0	10	76	10	9	1	3.0
	南7区	11	3	8	0	6	27	4	4	0	2.5
	南8区南	28	12	16	0	8	82	9	8	1	2.9
	南8区北	19	6	13	0	13	48	4	4	0	2.5
	南9区	9	0	8	1	4	19	1	1	0	2.1
	南11区	16	7	9	0	9	41	6	3	3	2.6
	南16区	18	8	10	0	12	42	3	3	0	2.3
	南17区	7	5	2	0	2	20	3	3	0	2.9
南18区	9	3	6	0	5	21	2	2	0	2.3	
広江	小々森	16	2	14	0	12	35	4	3	1	2.2
	広江東	11	1	9	1	8	28	4	2	2	2.5
	広江西	21	6	15	0	12	52	2	2	0	2.4

資料:第10次漁業センサス

である。また第2表は1998年の第10次漁業センサス漁業集落カードを基に、川副町の4つの漁業地区・計18漁業集落についてそれぞれの漁業の生産体制を詳細にみたものである。

のり養殖の中心地である川副町においても近年のり養殖経営体数が減少していることが判明する(第1表)。センサスによると1963年の川副町の個人経営体数は483で、以降、個人経営体は増加を続け1978年には711を記録している。またのり養殖経営体に着目すると、1978年には川副町全域で702軒ののり養殖経営体が存在したが、1998年には470、2003年には353にまで減少している。この一方で25ののり養殖協業体が設立されてきた。このように川副町においてはほぼすべての漁家がのり養殖を手がけていたが、これらのり養殖経営体数に近年では減少傾向が生じている。

次に川副町の自営漁業経営体の専業兼業別の構造を確認したい。1998年時点における川副町の総個人経営体数は481で、うち自営漁業のみの専業経営体が221、自営漁業が主の兼業経営体(第1種兼業経営体)が255、そして自営漁業が従の兼業経営体(第2種兼業経営体)が5であった。2003年には上記のそれぞれは177、160、15へと変化した。第2種兼業経営体のみが増大する結果となった。しかしながら、川副町全域では専業率は50.3%と約半数を維持し、第1種・第2種兼業率はそれぞ

れ45.5%、4.3%となり、第2種兼業に従事する比率が極めて小さい。また2003年までの5年間の専業および第1種兼業経営体の増加率はそれぞれ-20.0%と-37.3%を示したが、専業経営体の減少率の方が小さく、川副町の漁家の経営がのり養殖に依然として大きく依存している構造がここに看取することができる。

川副町における漁業経営は上述のように極めてのり養殖に特化したものとなっている。ここでは漁業集落カードのデータを用いて川副町の漁業集落の特性についてみてみたい。なお漁業集落とは、漁業地区の区域の一部において、一定の地理的領域と社会的領域によって成立している漁業の地域社会を指す。漁港を核に、その背後に当該漁港の利用関係にある個人経営体、漁業従事者世帯及び漁業関連産業に従事する者のいる世帯の社会生活面の一体性に基づいた居住範囲のうち、漁業世帯等が10戸以上存在するもの又は漁業世帯等の数が10戸未満であっても、総世帯数に対する漁業世帯等の割合が30%以上のものをいう。したがって第2表は川副町の全漁業経営体を含んでいないことに注意する必要がある。川副町には大詫間、早津江、南川副、そして広江の4つの漁業地区が設定され、合計18の漁業集落と323の漁業経営体から構成されている。このうち、のり養殖を行っていない経営体数は9つに過ぎない。

農業集落カードに記載の漁業経営体の性格は川副町全域の性格と軌を一にしている。専業率と第1種兼業率が高く、第2種兼業経営体は皆無に等しい。ここで漁業後継者についてみると、のり養殖に特化した川副町の漁業経営体においても後継者不足が深刻な状況になっていると判断できる。後継者なしの漁業経営体は158で、これは全体の48.9%に達する。のり養殖後継者を如何に育てるかが緊急の課題であるといえよう。これは漁業就業者数にも現れており、漁業世帯当たりの漁業就業者数の平均値は2.6人と3人を割り込んだ状態である。また65歳以上の高齢漁業就業者も認められ、早津江津集落では高齢者の比率は19.0%にも及んでいる。このように川副町においてものり養殖漁業者の高齢化と後継者不足といった問題が基底にあり、他の有明海沿岸域の漁業集落と同様に共通課題を抱えている。

4. 川副町南十六区周辺の土地利用

第2図は川副町南十六区周辺の土地利用を示したものである。第2図の北東角に川副町役場とその関連施設が立地し、南川副小学校の南には川副町の中心市街地である犬井道が展開している。犬井道から戸ヶ里漁港までは直線距離にして約1.3キロメートルあり、干拓地に発達した市街地が形成されている。図のほぼ中央部を南北に貫く県道佐賀川副線は有明佐賀空港に至る主要道路であり、沿道には地域スーパーの進出もみられる。これに対して南川副小学校の東端を走る旧道は幅員が狭く、道路の両側に商店や銀行、食品製造会社、サービス業などが連担し、旧来の中心商店街として機能してきた。

大小さまざまなクリークが縦横に走っている様子が土地利用図から看取できる。これらクリークに沿って、現在も海苔の乾燥を行っている漁家を含めて多数ののり養殖漁家が土地利用図の南半分の領域に分布している。のり養殖漁家はそのほとんどがクリークに直接面した地点に立地していることが判明する。これは、のり養殖漁家にとってはクリークの存在がのり養殖業の存立基盤であったからである。のり養殖の協業化は1990年代中葉に開始されたが、これ以前はほぼ全ての漁家においてそれぞれの敷地内にのり乾燥小屋を有し、のり生産を個別に行ってきた。のり生産の過程で摘み取ったのりを洗浄しなければならず、この排水はク



写真1

リークに放流していた。集落の景観要素は、クリークとクリーク沿いに連担したのり漁家、のり網やブイ、支柱などの漁具である。各敷地内には住宅とりのり乾燥小屋、のり漁具を保管する納屋が一つのセットとなっていることが容易に看取できる（写真1、写真2）。しかし、騒音・排水問題や多額の設備投資負担といったのり養殖をとりまく環境の変化にあわせて協業化が進展し、対象地域内では4軒のみがのりの乾燥作業を行っているに過ぎない。大部分ののり養殖漁家は協業化に伴い、漁港近くに近代的な施設を整備し、のり生産を行っている。なお、のり乾燥小屋は現在でも主にのり養殖漁具の倉庫として活用されている。

県道佐賀川副線の両側には農地が広がる。作付けは米麦が主であり、その他たまねぎやキャベツなどの路地野菜が栽培されている。のり養殖は冬期が繁忙期に当たるため、耕地を所有する漁家では、とりわけ冬期の農作業は委託生産に頼らざるを得ない。2000年世界農林業センサスによれば、南十六区の総農家数は7に過ぎず、これは1970年

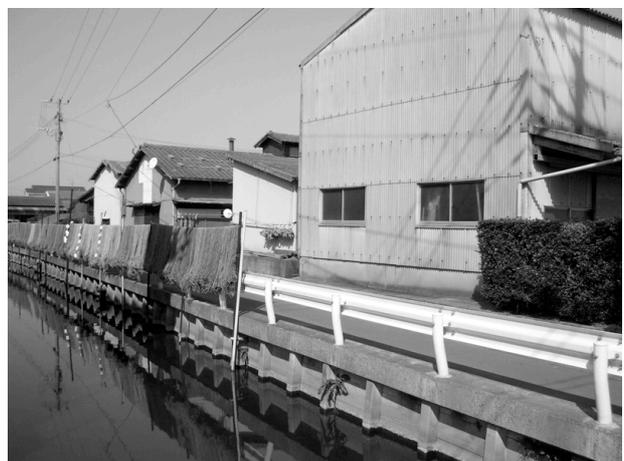
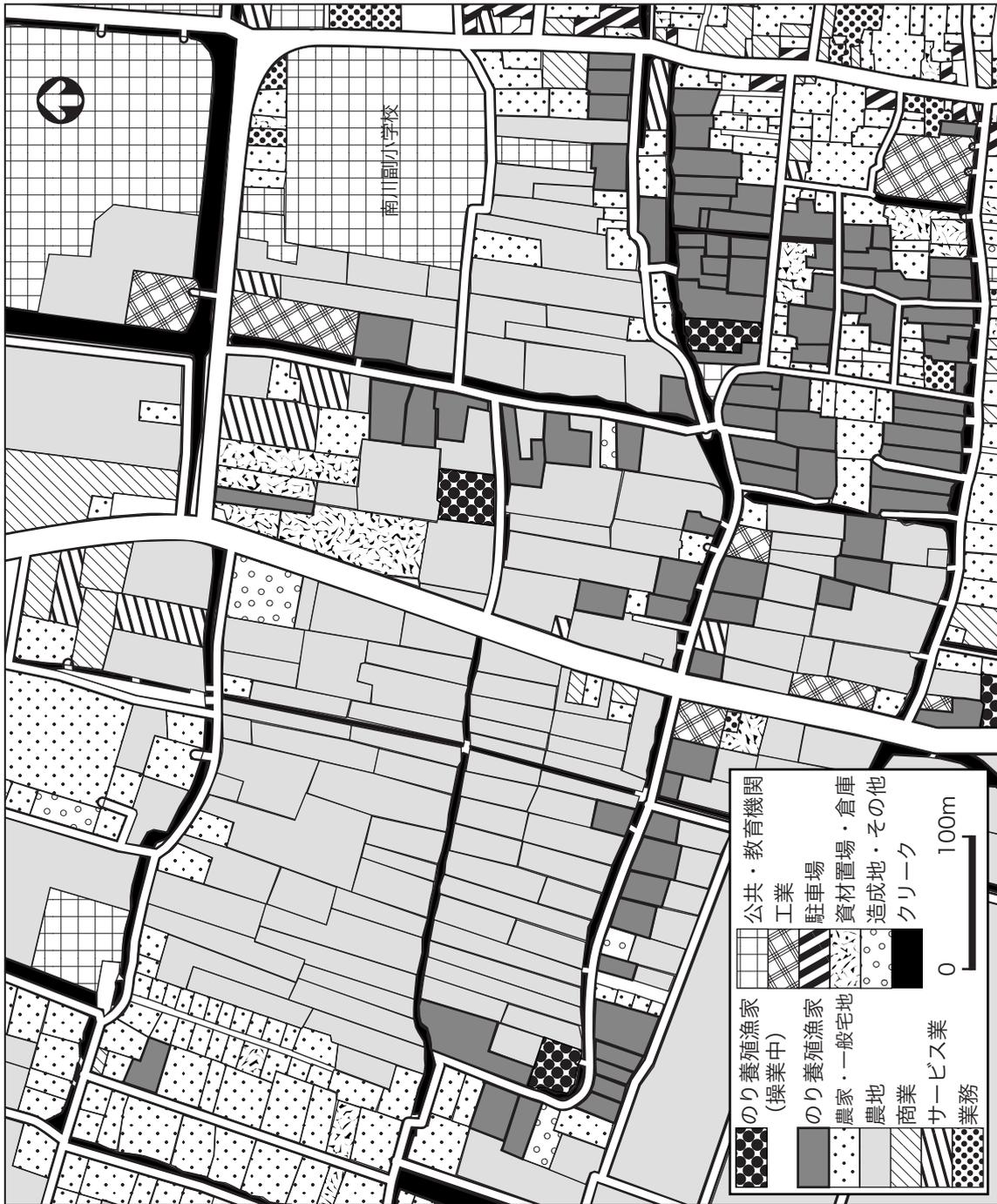


写真2



第2図 川副町南一六区周辺の土地利用（2007年）
現地調査により作成

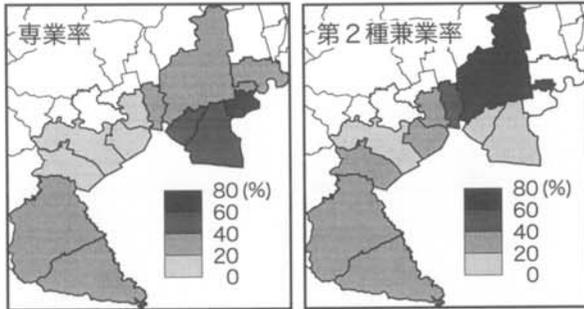
当時の32から大きく減少している。これら7農家のうち販売農家数は6で、専業農家は皆無で、第1種兼業農家は2、第2種兼業農家は4となっている。また1種兼業農家のうち生産年齢人口がいる農家は2つに過ぎない。農業分野においても高齢化の進行とともに後継者不足が生じている状況である。のり生産を主体とするのり養殖漁家では、耕作は夏季のわずかな野菜生産に限定されている。

土地利用図の北西には規則正しい区画の宅地が認められるが、これらは農地からの転用である。このような宅地以外に、のり乾燥小屋を宅地へと

変更する事例も集落内に点在している。のり養殖の協業化によって集落内の景観が変化しつつある。

5. のり養殖と兼業形態

佐賀県有明海においては、のり養殖をはじめ、刺網、採貝、潜水器漁業、小型底びき網といった多様な漁業活動が行われている。しかも海域によって主とする漁業に違いがみられる。例えば、筑後川河口から有明海湾奥部ではのり養殖が盛んであり、鹿島市では小型底びき網が、また太良町で

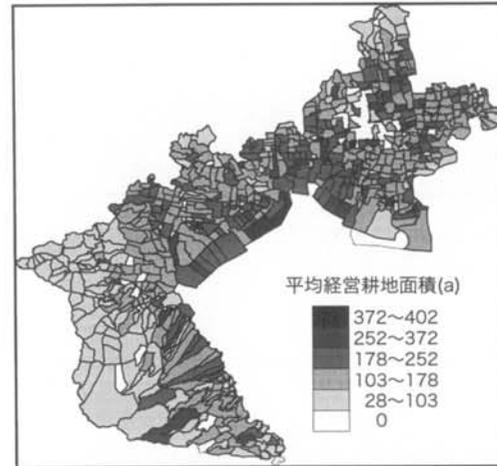


第3図 市町別専業率・第2種兼業率の分布(2003年)
資料:漁業センサス

は刺網や採貝が主たる漁業である。漁業活動を取り巻く環境は、漁業就業者の高齢化や漁業後継者不足、のり養殖漁獲量の年較差、近年のタイラギをはじめとする二枚貝の不漁など、漁業経営者に起因する問題とともに有明海の異変が加わり深刻さが増しているといえる。そこでこの多様な漁業活動を如何に維持し持続可能なものへと移行していくかが問われている。

川副町の事例で確認できたが、のり養殖専業経営が大部分を占める状況においても近年では協業化が徐々に進行しつつある。その一方で、芦刈町(現・小城市)や福富町(現・白石町)のように県内で最も早く1995年に協業を開始したところもあり、のり養殖経営体を取り巻く環境によって協業化の進展度合いには差が認められる(山下、2005)。

わが国の多くの沿岸集落ではいわゆる「半農半漁村」としての性格を有した産業の組み合わせが一般的であり、漁業と農業や林業などが個別の生産活動として営まれたものではなく、相互に密接に関連づけられていた。基本的には自給農業と漁業という組み合わせであり、そこには労働の季節配分が組み入れられていた(尾留川ほか、1978)⁴⁾。第3図は、漁業活動を主体として場合の有明海沿岸域における漁業専業率・第2種兼業率を市町別に示したものである。全域の平均の専業率は32.6%で、諸富町(68.7%)をはじめ、川副町(全域:50.3%、大詫間:53.5%、早津江:81.8%、南川副:43.5%、広江:46.5%)、東与賀町(41.3%)と高い。その一方で専業率が低いのは有明町(9.1%)、芦刈町(13.5%)、白石町(13.9%)である。第1種と第2種兼業率の平均値はそれぞれ45.7%と21.7%である。兼業化の進展した自営漁業が従である第2種兼業率に目を移すと、佐賀市(60.0%)や久保田町(46.2%)、太良町(37.9%)において高く、有明海中部から西部、南部地区へと面的な広がりをみせている。



第4図 有明海沿岸域における農業集落別一戸あたりの経営耕地面積の分布(2000年)
資料:農林業センサス

兼業形態の中身であるが、第1種および第2種兼業経営体のいずれにおいても農業との兼業が最多で一般的である。第1種兼業経営体の場合は、次いで漁業以外の雇われ(常雇)が多く、臨雇・日雇が続いている。これに対して第2種兼業経営体の場合は、協業化に移行した共同経営に従事するものが多く、雇われ(常雇)と続く。このように佐賀県有明海沿岸域では漁業と農業との兼業形態である。しかし川副町のように現在においてものり養殖に特化した地域においては、第1種兼業形態では漁業以外の雇われである常雇が農業とほぼ同数もしくは上回る傾向にある。そのため第4図が示すように、農業集落別にみた一戸あたりの経営耕地面積が大きな地域とのり養殖の盛んな地域とは互いに相反する関係に置かれている。これはのり養殖と農業との労働の季節的な平準化が極めて困難であることを意味しているといえよう。

6. むすび

川副町南川副集落におけるのり養殖漁家の原型は、母屋、母屋と同一の敷地内に併設したのり乾燥小屋、のり網の干場、用具の保管小屋、そして駐車場やタンクなどの施設から構成され、これら一組を各漁家がそれぞれに有し、集落内を流れるクリーク沿いに漁家が連担している点にあった。南川副集落はのり養殖経営に特化した集落であり、各漁家は自立し競い合いながらのり養殖を行ってきた。

南川副集落はのり養殖専業漁家が多数を占めていたため協業化の必要性は薄かったといえる。し

かしながら南川副集落においても1998年以降に協業化が急速に広まり、2004年現在では18の協業体が組織され、協業体への移行率は39.7%に及んでいる。この結果、有明海沿岸域では最多の協業数を有するまでになっている。この背景には就業者の高齢化と後継者不足がある。また、のり生産にともなう排水処理問題や騒音問題といった要素も協業化の進展に拍車をかけ、漁港近辺にのり乾燥機器を設置するに至っている。

のり養殖漁家の就業構造は家族労働が中心であった。兼業形態は、のり養殖経営が主である第1種兼業である。のり養殖の繁忙期と水田耕作の農閑期が重なるにもかかわらず農業との兼業は多いとはいえ、むしろ委託農業が多数を占めると思われる。有明海沿岸域の持続可能な漁業活動を構築する上で、のり養殖経営を合理的に行う仕組みの開発や他産業との関連づけをさらに検討する必要があると考える。この点を深化させるためには、個々ののり養殖経営体に関する分析とともに他の漁業活動に関する分析も必要だと考える。

参考文献

- 1) 島 秀典：有明海ノリ養殖業と協業化，東京水産振興会『漁業経営（組織・管理方式）のあり方 ―最終報告―』，59-75，2002.
- 2) 片岡千賀之：ノリ養殖の協業化と漁協委託加工 ―佐賀有明海の事例―，農業経済研究48-1，59-75，2003.
- 3) 山下宗利：有明海におけるのり養殖協業化の進展，佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集，41-48，2005.
- 4) 尾留川正平・山本正三・高橋伸夫・石井英也・田林明・桜井明久：南伊豆における沿岸集落の変貌，尾留川正平・山本正三編著『沿岸集落の生態 ―南伊豆における沿岸集落の地理学的研究―』，1-21，1978.

(2007.3.20受付)

日韓両国の干潟生態系における食用水族資源の 再生産力と採捕量等に関する計時的・計量的比較研究

3 : 韓国における干拓の歴史と群山周辺の漁撈

MARINE RESOURCES ON TIFAL FLATS 3: HISTORY OF RECLAMATION AND FISHING ACTIVITIES AT KUNSAN, KOREA

武田 淳
Jun TAKEDA

理博 佐賀大学教授 農学部生物生産学科 農学部地域資源学研究室 (〒840-8502 佐賀市本庄1番地)

Tidal flats have been reclaimed in Japan and Korea in the past, and large-scale reclamations are still now on under construction in both countries. This report is focused on the history of reclamation in South Korea with special reference to the traditional fishing-gleaning activities carried out around Kunsan, Chollabuk-do in the middle part of the Peninsula of Korea along the Yellow Sea. Various important aspects of tidal flats are reviewed and stressed from ecological anthropology in the text.

Key Words: Marine resources, Tidal flats, Traditional fishing-gleaning activities, Reclamation

はじめに

日本をはるかにしのぐ干潟面積を擁する朝鮮半島においても日本と同様に干拓・埋立ての歴史がある。日帝時代と呼ばれる植民地時代(1938~1945)においても干拓と埋立ては続けられていた。日帝時代に全羅南道・莞道(ワンドー)正道里で行われた干拓農地拡充と管理組織について触れた事例研究はある(宣・趙・武田, 1999)が、干拓と埋め立ての全貌や詳細についてはさだかではないばかりか、十分な情報でない場合が多い。

韓国の干潟では、食糧の自給自足を目指した農地確保と産業化に伴う土地不足の補充という目的のために沿岸地域の干潟などを中心に干拓と埋立て

が盛んに行なわれるようになった。とくに臨海産業団地の造成による国土拡張が1970~1980年代半ばまで、大規模に行なわれた。今なお、国家的な規模で展開されてきた歴史と現状に触れ、セマングム干拓事業に直面し、その干潟資源に強く依存してきた漁民の姿を描きながら、その一端を紹介する。

干潟と干拓の歴史

佐賀県は、日本の630.5 km²という全干潟面積のうち、およそ40%の263.0 km²を擁しているが、朝鮮半島には広大な干潟が発達している。平安南北道と黄海道に2,670 km²の干潟面積をもつ北朝鮮に対して、韓国には西・南海岸を中心に国土面積の2.4%にあ

たる 2,393 km²の干潟が発達している。韓国の場合、干満差の小さく干潟がほとんど存在しない東岸に対して、干潟全体の83%にあたる1,980 km²が西海岸地域に、残りは南海岸に分布している。干潟面積の地域別の内訳では、全羅南道が44%、仁川（インチョン）・京畿道（キョンギド）が35%、忠清南道（チュンチョンナムド）が13%、全羅北道（チョンラブクトド）が5%、釜山（プサン）・慶尚南道（キョンサンナムド）が3%になり、京畿道と全羅南道だけで韓国の干潟の80%を占めている。

榮山江（ヨンサンガン）四段階開発事業は、1972年度の“西南海岸干拓農地開発事業案”の総合計画として、主に全羅南道の西南地域と島嶼地域を対象に朴正熙（パク チョンヒ）大統領時代に構想されたものである。この榮山江流域大段位干拓事業は榮山江をはじめ金浦（キムポ）、始華（シファ）、大湖（デホ）、瑞山（ソサン）など西海岸の約10カ所を開発の対象にしたもので、その事業期間は1982～2026年までの45年を想定した大規模なものである。先ず、第一段階では榮山江上流の全羅南道長城（ジャンソン）と譚陽（タムヤン）などに4つのダムを建設し、1972～1978年に完了した。第二段階は木浦（モッポ）市周辺の榮山江河口堰を造り、1981年に完工した。第三段階では靈岩（ヨンアム）防潮堤と錦湖（コムホ）防潮堤の建設が各々1981年と1994年に終了した。最後の第四段階においては、1992年に咸平（ハムピョン）湾をはじめ務安（ムアン）郡、新安（シンアン）郡、靈光（ヨンクァン）郡、木浦が干拓の候補地として選定されたが、その中でも咸平湾の場合、多くの地域住民たち、環境保護運動の市民団体や学者たちの反対運動によって計画が中断した経緯がある。それに拍車をかけたのは、折しも1997年に咸平湾が水産資源保全地区に指定されたことで、地域住民たちのあいだに干潟を保全する気運が高まった背景も無視できない。 国土拡

張期の1970～1980年代の場合は、干拓や埋立てによる補償をめぐって埋立ての施行主体である韓国水資源公社や韓国農漁村基盤公社などと地元住民とのあいだに適切な補償費をめぐって確執が目立つようになった。しかし、1987年に着工した始華干拓事業は、その規模が長崎県・諫早湾干拓事業（潮受け堤防）の約6倍という広大なものである。約17,000haの広大な干潟を閉め切り、約6,000haの淡水湖（始華湖）、約5,000haの農地と工業団地、そして10,000haの宅地をつくった。韓国での干拓事業の典型的な失敗作だと言われているが、韓国での干潟資源の価値を見直す社会的な認識が一気に高まる契機を生み出した。干潟を生活・生業の基盤としている地域住民たちに補償問題を引き起こす一方で、自然生態系の破壊、干拓予定地の高密度の空間利用による海域環境汚染などについて様々な問題意識を抱かせる結果になった。

また最近では、閉め切り面積約40,000ha、造成面積約28,000haという世界最大規模の干拓といわれるセマングム総合開発事業は1991年に着工が開始された。しかし干潟資源で生計を立てている地域住民たちのあいだに補償問題を再燃させているばかりか、韓国での干潟の多様な機能や価値に対する社会的な認識・意識を高揚するきっかけになった。特にセマングム干拓地の干潟は、韓国で消費されるハマグリやアサリの約70%を産出する宝庫であるため、そこを生活の場としている住民には深刻な問題になっている。

現在の干潟は、1987年以来施行されてきた干拓のために全体の約15%にあたる422.4 km²が消失したことになる。しかし調査方法や分析方法が異なるため、実際にはもっと多い約30～40%の面積が失われたともいわれる。始華地区とセマングム地区などでの干拓と埋立て事業で失われた干潟の面積は、810.5 km²と見積もられ、これだけでも全体の29%程

度の干潟が失われた計算になる。

干潟がこのように急速に消失したのは、埋立てが容易に行われる脆弱な干潟生態系を無視した開発、特に大規模な干拓を優先にした国家的な事業に大きな原因がある。現在のような速度で干拓と埋立てが今後も行われれば、韓国の干潟は 2006 年には約 2000 km²しか残らないともいわれている。

韓国において日本の植民地時代に多くの干潟が米の増産のもとに干拓された歴史がある。とくに 1917～1938 年にかけて干拓された面積は 405 km²に達し、すでにこの時期に重要な干潟の多くが干拓されてしまったと認めざるを得ない。当時干拓された干潟は、いわゆるシチメンソウなどの塩生植物が生育するところであった。また、産業が進んだ 1960～1970

年代以後の干拓面積（1960 年代の 172 km²と 1970 年代の 194 km²）を合わせても植民地時代に干拓された面積におよばない。日帝時代と呼ばれる植民地時代にいかに大規模に干拓されたかが、容易に推定することができる。しかし、1980 年代の総干拓面積は約 100 km²で、1960～1970 年代の半分に過ぎないが、1990 年代に入ると再び干拓が活発に行われるようになり、今後、干拓埋立て工事のなり行きを十分見とどける必要がある（表 1）。

現在、干拓と埋立て事業が行われている面積だけでも約 600 km²におよび、首都圏のごみ埋立て場建設、始華地区農工団地造成、仁川（インチョン）新空港建設、セマングム干拓など、今までとは異なってより大規模な干拓工事が行われている。

表 1 植民地時代から現在まで干拓された面積

年度	地区数	面積 (km ²)	備考
1917 年以前			干拓記録なし
1917～1938	178	405	植民地時代：産米増産計画
1938～1945			植民地時代：太平洋戦争
1946～1960	177	6	
1961～1969	1, 136	172	第一次経済開発 5 ヶ年計画
1970～1979	233	194	農業開発事業推進
1980～1989	63	93	民間企業の大規模干拓事業への参入
1990～1994	8	99	
1995～進行中	21	621	
開発予定	149	2, 726	
総計	1, 795	1, 026	1917～1994 年干拓完工地域

出典：農漁村振興公社（1996）、「韓国の干潟」

群山（クンサン）周辺の漁撈

全北沿岸漁場は、済州道（チェチュド）の西方を通って北上する暖流と、南下する寒流がぶつかるために古来、水族資源が豊富で、しかも魚類の産卵場としても知られている。群山近海には界火島、飛鷹島、内草島、古群山列島、開也島、竹島、於青島、十二東波島などを含めた有人島が 60 もある島嶼である。また干満の差（潮汐差）が大きいために海底

が露出する干潮時には貝類が多く、その漁獲高は全国の 70%にも達する。ハマグリ、オキシジミ、アカニシ、ツベタガイなどが重要で代表的な食用貝である。

群山近海においては、1880 年代から日本や清国（現在、中国）からも多くの漁船がきて漁撈活動が盛んに行なわれてきた。群山近海の漁場の盛漁期は春と秋に 2 回である。3 月末頃から沿岸のヒラメ、シラ

ウオ、エビなどが、そして6月頃まではイシモチ、タイ、サメ、カレイ、ヒラメ、イカ、於青島付近のサバなどを対象にした近海漁業が盛況になる。この時には日本船や他道船などの漁船が数百隻に達したという。また7～8月頃にはカタクチイワシ、スズキ、イシモチ、サメ、タイ、ハモ、エビ、ブリなどが、また冬には於青島付近ではエイ、ガンギエイが捕れた。

群山近海の漁法は周辺国の密漁や漁業権侵害の影響を受けて、漁具や漁撈方法の近代化を生み出す契機になった。鮫鱈網、各種延縄釣、尾中漁網、各種刺網、流網、建干網、魚箭小手操網、各種一本釣などの多様化も見られるようになった（表2）。なお、群山前海で初めて在来式手操網に機船を使用したのが機先底引き漁業の嚆矢であると知られているが、その記録は残されていない。

貝類の宝庫・下梯（ハゼ）港

下梯港は1940～1950年代までは5～6世帯の民家しかない寒村であった。しかし、バカガイが無尽蔵に捕れることが、多くの漁船を引きつけるようになった。また当時、下梯港の前海2～3km沿岸ではイシモチ、シバエビ、タチウオなどの魚類も多く捕れるばかりか、アカガイ、ハマグリ、シオフキガイ、アサリ、マテガイなど多くの貝類も捕れる。ハマグリなどの貝類は、主にクーレーあるいはクレーと呼ばれる採集道具を使う。

1997年度は一日に貝類だけで約20トン（1997年の総売り上げ量は15,243トン）以上も販売された。1997年の漁村契（日本の漁村組合に相当する）員は398名で売り上げ所得は約40億ウォン（1円＝大体10ウォン）であった。1970年代の下梯港には下梯の漁船だけで約250隻、全羅南道高興（コホン）や光陽（カンヤン）などの他地域からきた漁船を含めると約400～500隻の漁船が港を賑わした。

1970年代半ばにはバカガイの加工工場が7～8ヶ所まで増えた。

漁民たちが鎌（「ホミ」と呼ばれる）で捕ってきたバカガイを加工工場では煮て、殻を剥いたものを、ほとんど日本に輸出していた。

貝類の宝庫である下梯港は昔から生活の場として漁民たちにはかけがいのない干潟であった。しかし郡長（グンジャン）国家工団に続いて1991年にセマングム干拓事業の着工と同時に漁業補償が行なわれるようになって、1996年には補償はほとんど完了した状況にある。

220隻の漁船が、1隻あたり約3,500～8,000ウォンの漁業補償費をうけとった。まだ150隻が現在も漁業を行なっているが、補償を受けてからは、これまで平穏であった下梯の村にさまざまな弊害が起きるようになった。村人間の信頼関係がなくなり、荒れ果てた人心だけが残ってしまったからである。

このような事態は下梯村だけではなく、セマングム干拓事業にかかわる他の村にも同様なことが起きている。

漁民に対する補償の基準が曖昧であったことが、こうした関係を生んだ理由の一つであろう。つまり補償基準を設定（査定）するときに、セマングム干拓事業や個々の収入などに関して、漁民たちに十分な説明や事前調査が行なわれていなかったからである。下梯村では現在も漁業の免許権や耕作権をめぐって告訴や訴訟が後を絶えない。そして、まだ5件ほどの集団訴訟が裁判所に係争中である。

漁村契長の高さん（2006年現在、66歳）は、韓国政府が事前の漁業補償ののちに、干拓工事を行うための原則を守らなければいけないと話す。しかし国は工事を先に着工し、現在堤防の工事が約70%まで進行しているにもかかわらず、補償はまだ終わっていない。その補償も少しずつ行なうために漁民たちは生活の場を失うばかりか、住宅の建築や改造に

表 2 群山地区における主要な漁種、漁法と漁場

魚名	漁期	主な漁法	主な漁場	主な販売先
イシモチ	4月中旬～5月	鮫鱈網	高敞郡沖海 古群山近海 煙島西沖海	全州、光州 金泉、大田
エビ	4月中旬～5月 7月中旬～9月下旬	エビ刺網 尾中船 濤内鮫鱈 エビ笥	高敞郡沖海 界火島 竹島沿岸	日本、奉天 ソウル
タイ	5月～6月 7月～10月	機船手操 延縄 一本釣	竹島 煙島近海 十二東波島 於青島	日本、奉天 ソウル
サワラ	5月上旬～下旬	サワラ流網 サワラ曳釣	竹島沖海	日本、奉天 ソウル
ニベ	4月中旬～8月下旬	鮫鱈網 中船網 延網 柱木網	古群山島 十二東波島 煙島付近	全州、光州 金泉、永同 大邱、南原
ガンギエイ	12月～3月	延網	於青島沖海	全州、光州 金泉、永同 大邱、南原
マナガツオ	6月上旬～下旬	鯖流網	錦江内と河口 竹島近海	同上
タチウオ	5月中旬～6月中旬	鮫鱈網 タチウオ延網	古群山島 煙島 於青島沖海	同上
サバ・アジ	6月上旬～7月中旬	鯖流網	於青島沖海	同上
ウナギ	11月上旬～12月下旬 3月～4月	延網 延網	於青島沖海	同上
マダラ	12月中旬～4月中旬		於青島沖海	同上
ヒラメ	4月中旬～5月下旬 8月中旬～10月中旬	小手操網 空掛	延山沖海 古群山近海 開也島, 於青島近海	同上
スズキ	5月中旬～8月下旬	延縄	古群山 十二東波島 竹島	全州、光州 南原、金提 大田
イカ	5月中旬～六月中旬	イカ笥	高敞郡沖海 古群山 竹島近海	同上
シラウオ	4月上旬～下旬	尾中船		日本、全州 ソウル、大邱、南原

あてた補償金は底をつき、生活そのものが厳しい経済状況に陥っている人も少なくない。そのため、村の漁民たちは、新しい漁場の開発がもっとも急務を要する課題の一つであると強調する。

漁村契では1996年まで約580haの干潟でアサリ、バカガイなどの養殖を行なった。しかし今は、堤防工事が終るまで養殖が可能なところはわずか17haにすぎない。堤防工事の終了に備えて新漁場になる養殖場を約20ha確保しているものの、十分でなく、現在も不安の種になっている。セマングム干拓事業によって生活の場を失いつつある漁民たちは補償問題をはじめ、子供たちの将来、これからの生活などに不安が大きい。

おわりに：韓国の干潟の学術的意義

韓国中西部、群山市近くの黄海に面した東津江（トンジンガン）河口一帯を埋め立てて、優良農地28,300haと5億3,500 m³の水資源を確保し、12,000haの流域農地の浸水を解消するために1991年に着工し、長さ33 kmにおよぶ防潮堤などを建設中のセマングム干拓事業は、「韓国の諫早湾干拓」版とも呼ばれる。事業の必要性を説き、事業の継続を強行したい国側と干潟保護などを訴え、工事中止を求める環境団体が、この干拓事業の可否をめぐって、訴訟を続けていた経緯がある。この長年の訴訟も、2005年12月21日にソウル高等法院が工事再開の判決を下した。これで国側が全面的な勝利を得たというわけではなく、今後も用意周到な環境アセスメントをし直しながら、地元漁民をはじめ、住民たちや環境団体の意見なども汲み上げて、着工のフィードバックをしていかななくてはならない。

初めて下梯港を目の当たりにしたとき、貝殻が山のように堆積していて、その量の大きさと豊穡さに心を打たれた。きっと大森貝塚を発見したエドワー

ド・S・モース（武田、2002）も同じ思いだったのではないかと推測したほどである。一度失った自然生態系を再び同じ環境に復元できるはずはないからである。

今後も、群山や下梯などで広大な干潟資源に強く依存して、西経の基盤を築いていた漁民を対象にした緻密な現地調査は不可欠である。そのさい、干潟水族資源の伝統的な採捕技術・持続的資源利用や資源の維持管理などに焦点を当てた現地調査を推進していく必要がある。同時に、群山の広大な干潟に産出してきた干潟水族資源がセマングムの大干拓事業により、環境変化と汚染にさらされている現状から、調査は急務を要するものである。そしてセマングムだけでなく、韓国の干潟がかけがえのない豊穡の海であったこと、生産性が高い海であること、さらに将来も持続・保全しなくてはならない宝の海であることを学術的にも明らかにし、その意義を地域住民自らに納得してもらう義務と同時に認識を深めてもらう努力が必要である。

そのために広大な干潟で展開されてきた、あるいは、されている多種多様な水族資源の伝統的な利用形態や採捕・維持管理技術などについてきめ細かい聞き取りと現地調査を実施・継続しなくてはならない。

引用文献

- 1) 農漁村振興公社（1996）韓国の干潟。農漁村振興公社、ソウル。
- 2) 宣 英蘭・趙 慶萬・武田 淳（1999）植民地時代の干拓農地拡充による共同体的資源利用法—韓国・全羅南道莞道の新農場と正道新農道組合の事例—。佐賀大学農学部彙報 84：29-49。
- 3) 武田 淳（2002）シャミセンガイとオオシャミセンガイ：有明海に産する、生きている化石、海辺からのたより7：8。

有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける文化的景観の保全(2)

—有明海北西部における海苔養殖漁家の複合的生業—

Conservation of Multiple Cultural -landscape in the Inshore Ecotone, Ariake and Yatsushiro Sea(2):
Multiple Subsistence of Seaweed Grower -Fisherman in the north-east Ariake Sea

五十嵐 勉

Tsutomu IGARASHI

文修 佐賀大学助教授 農学部生物環境科学科・地域資源学研究室(人文地理学)(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

It is important to consider the ecotone in seashore, especially in the argument of conservation of wetlands. The secondary ecotone as a transitional zone from reclaimed land to tidal flats is very important spaces. Because there is a bio-diversity and multiple subsistence by inhabitants. In addition, these sustainable production and life style formed multiple cultural landscapes.

A great deal of effort has been made on the reclamation or land improvement in tidal land. What seem to be lacking, however, is a consideration on sustainability of the reclaimed land and a sustainable subsistence system. This sustainability was made possible by the single-dike type reclamation before introduction of *inpoldering* (the duplex-dyke type reclamation) in the after World War II. The main reason is that most settlers engaged not only farming in reclaimed land, but also fishery in tidal flat. This multiple subsistence offers the key to an understanding of the sustainable use of tidal land.

In this paper, so far, we have seen that multiple subsistence of seaweed grower-fisherman are very important role for sustainable development in the inshore ecotone.

Key Words: *Seashore ecotone, Cultural landscapes, Subsistence structure, Multiple subsistence, Seaweed grower-fisherman*

1. 干潟沿岸域エコトーンにおける複合的生業と文化的景観の生成、およびその保全

内湾域の有明海と八代海では、継起的な干拓(単式干拓)によって形成された干拓地での農耕と、干拓地内の溝渠(クリーク)や調整池での淡水(水田)漁撈、干潟域での干潟漁撈、そして浅海漁業(その後の海苔養殖)という複合的な生業が持続的に行われてきた。一般に「半農半漁」と呼ばれる生業形態は、湿地域での自給や「おかずとり」を含む多様な資源利用を伴うもので、漁業と農業以外にも兼業の雇用労働も含む生業形態であり、本稿では複合的な生業として位置づける。

かかる干潟沿岸域エコトーンにおける生業複合は、干拓地・干潟漁撈景観などからなる複合的な文化的景

観を生み出した。文化的景観とは、棚田や里山・里地・里海のような「地域における人々の生活又は生業及び当該地域の風土により形成された景観」とされ、文化財保護法の一部改正によって、このような文化的景観が新たな文化財として位置づけられ、地域の歴史や文化と密接に関わる固有の風土的特色を表す文化的資産であり、我が国の歴史、文化等の正しい理解のため欠くことのできないものとして保護することが定められた。これらの文化的景観の保存の動きは、ユネスコの世界文化遺産の指定制度やワイズ・ユースを前提とするラムサール条約登録地などでの、自然環境と人間の営為の密接な関係性の所産と見なす文化的景観に関する国際的な動向が背景にある。

しかしながら、特に、戦後の大規模干拓地の造成と、そこでの米麦二毛作農業を中心とする高投入型近代農

業と海苔養殖業の展開は、一面で、生業の単一化をもたらし、それは「景観のモノカルチャー化」という極めて現代的な問題を生じさせたのである。これらの生業と景観の単一化は、環境負荷の増大や「有明海異変」などの環境変化に対して極めて脆弱な対応を余儀なくされる宿命を有している。さらには、経営の持続性を前提とする海苔養殖における協業化や佐賀平坦地の米麦農業地域における認定農業者や集落営農の進展は、農民・漁民による干潟沿岸域エコトーンにおける伝統的な「関わり」を希薄化させつつあるのみならず、高齢化や後継者不足の問題に直面し、持続性そのものを脅かしつつある。

有明海区は、現在においても、日本有数の「半農半漁」率の高い地域である。かかる複合的生業は、干潟の地先干拓と干潟漁撈の長期にわたる営みに根ざしたものであり、地先の共同漁業権から海苔の漁業権の獲得を経て、海苔モノカルチャーの生業構造へと展開してきたものと予想される。

本稿では、かかる沿岸域エコトーンにおける海苔養殖漁家を中心とする漁民の生業構造の変遷と複合的生業の持つ現代的意味について、白石平野の福富町、及び鹿島市を事例に考察する。

2 白石平野における複合的生業の生成と生業構造

(1) 地先(単式)干拓と干潟の共同漁業権

近世以降の地先干拓は、干拓地での営農と干潟での漁撈(採捕活動)、そして浅海での漁業活動を伴いながら進展した。江戸後期の作とされる『有明海漁業実況図』には、農具の板鍬で干潟を掘ってメカジヤやガンツケガニをとる採捕活動や網漁の様子が描かれている。これらの漁法のほとんどは今日まで継承されており、農具と漁具との巧みな「転用」に留まらず、メカジヤなどの貝類や干潟の泥土を肥料として農地に利用することや干拓地(潮受け堤防)での龍王(海神)信仰など、農耕と漁撈の密接な繋がりが認められる。

白石平野における国営有明大干拓において、入植を含めて増反地の配分増を熱心にかつ組織的に運動したのは、「漁業者」であった。1946(昭和28)年に、杵島郡有明海漁業共同組合連合会からの陳情書「有明海干拓地入植に於いて地元漁民優先取り扱いについての御願」(『有明干拓史』所収)には、「魚場は有明海全漁民の共同所有に属するもの」と位置づけ、次のような漁業補償の根拠と漁業の特質が述べられている。

「(前略) 従って干拓の新規計画特にその地域策定につきましては事前に全漁民の承諾を得る措置を講じてもらいたい。干拓事業竣成後の営農に当たっては別に述べます通り有明海の漁民は半農半漁的職業形態の漁民であり常に海岸第一線の干拓営農に深い経

験と実績をもつものでありますれば新村落形成の中核体としてこの地帯開発に積極的に参加せしめられたい。(中略) この地帯の漁業は干潟面で行なわれる貝類の採取又はその養殖を主体とするので、この干潟面が主要なる漁場であり又魚類を対象とする建干、源式、竹羽瀬等網漁業に於きましても、この干潟潮流を利用してなされる漁業であり干潟面即漁場と断ずることができるのであります。従って漁具漁法は簡単容易であって比較的に高級の技術経験等を必要とせず誰にでも出来ると云ふ特色があるのであります(傍点筆者注)。

これによれば、漁民は半農半漁の生業を継続してきたこと、そして漁民は同時に干拓営農に経験と実績を持っていることを干拓地農地の配分を受けるための入植、なしは増反意欲の根拠とし、干潟での漁法の説明と漁法が比較的容易な技術であることが表明されている。これは干拓地での農耕や干潟・浅海での漁撈(一部に前述のような溜池や堀・江湖でのフナやウナギの漁撈を含む)が複合的な生業として組み込まれていたことを如実に示している。

この結果、干拓地への増反入植「農民」は、潮受け堤防の地先に継続的に発達した干潟域での共同業権に基づく漁撈活動(コモンズ)も継続し、牡蠣養殖の私的な漁業権の獲得へと展開していく。この漁業権は、基本的には1950年代以降の海苔養殖漁業権へと継承された。有明海沿岸域では、1955年頃から海苔養殖業が発達し、同時に、佐賀段階期における干拓地での米麦二毛作の機械化の進展によって、干潟での漁撈活動を組み合わせた複合的生業の仕組みが失われ始めた。地先の干潟漁撈は、先述のように干潟を共有資源とみなし、独占的な利用権は希薄であった。しかしながら、海苔養殖における海苔網の設置は、漁協を単位とする独占的な利用となり、干潟と浅海は囲い込まれた。

今日では、農業も海苔養殖も、個人経営から「協業化」へと移行しつつある。海苔養殖は、主に冬場を中心とした時期に作業を行うが、7月過ぎから網干しなどの陸の作業、9月から竹立てなどの海の作業を行い、11月から2月までの間に秋芽と冷凍網合わせて7回程度の海苔の摘採を行うが、協業化は機械化や労働配分などの点で合理的であるとされる。有明海区の佐賀県西部・南部地域では、規模の小さな経営体が多く協業化率が比較的高いが、川副町などと比べて白石・鹿島地域では干潟漁撈や浅海漁業、そして伝統的に農業との複合形態が残存している。

(2) 白石平野福富町における海苔養殖漁家の複合的生業

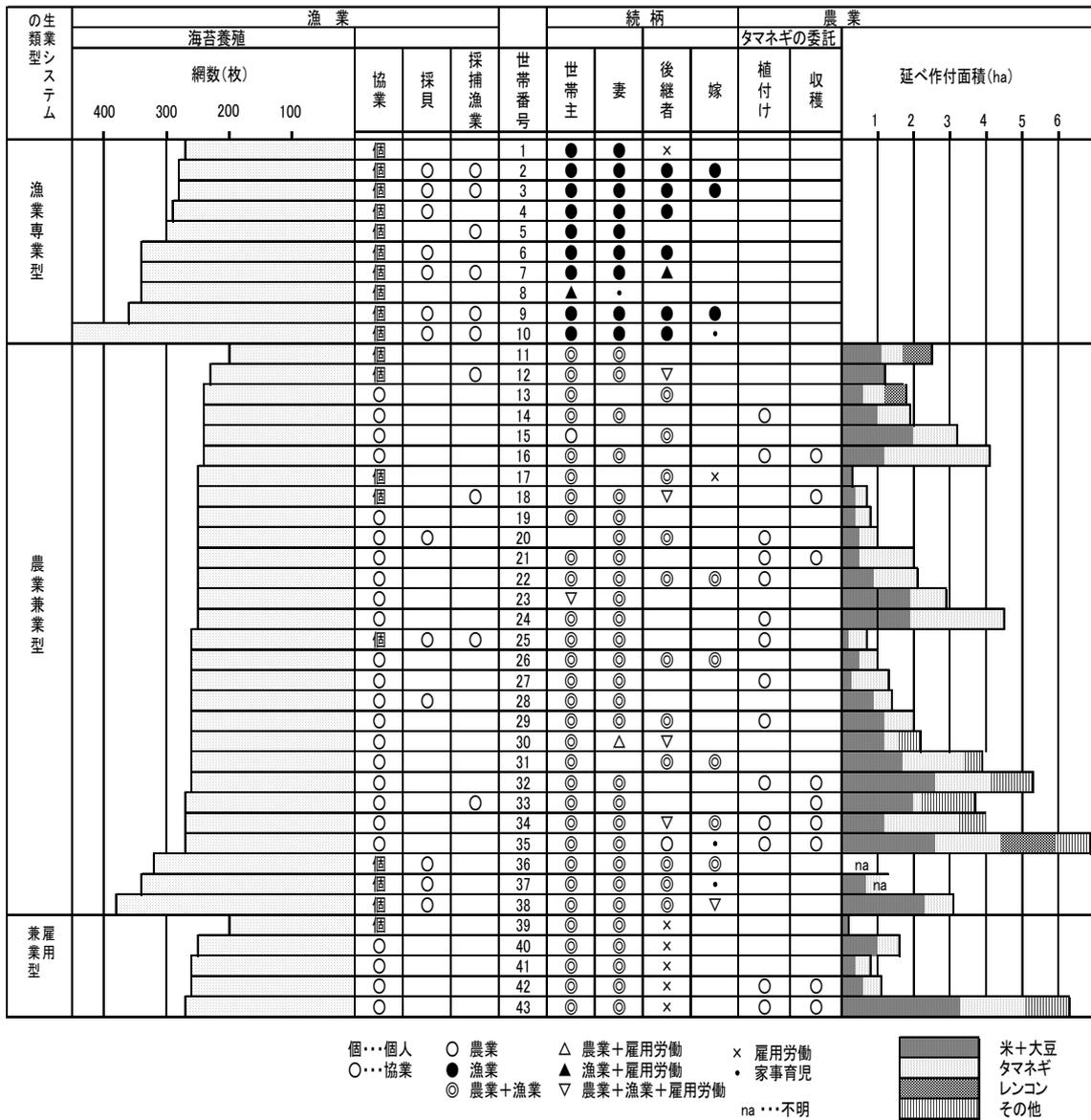


図1 福富町A地区における生業構造 (2006年)

遠藤(2005)による分析をその後の追加調査(聞き取り調査)により加筆・修正

福富町A地区における海苔養殖漁家43戸について、その生業形態をみたのが図1である。A地区は漁村部と農村部からなり、10戸が漁業専業で残る33戸は農業、農業と兼業を組み合わせた複合的な生業である。漁業専業漁家は、平均300枚ほどの海苔網を持ち、全て個別経営であるが半数以上が後継者を有している。海苔以外にサルボウの採貝漁撈やワラスボなどの採捕漁業を行っている。農業や兼業の複合的な生業を営む海苔漁家は、海苔網が平均250枚程で、協業化している割合が高い。後継者は8割ほどいるが親世代と同様の生業形態であるが、臨時的な雇用を含む兼業が多い。

農業は水稻と裏作の大豆・タマネギ・レンコンが中心である。しかし、タマネギは海苔の漁期と重なるため、植付けと収穫を委託する割合が高い傾向にある。世帯主の

高齢化が進んでいるが、副業としての干潟漁撈は、周年の海苔の漁閑期(春から夏:図2参照)に行われているが、同時に小遣い稼ぎや遊びや楽しみとしての干潟での漁撈活動(マイナー・サブシステム)は、一日の潮汐のディリー・リズムに組み込まれている。

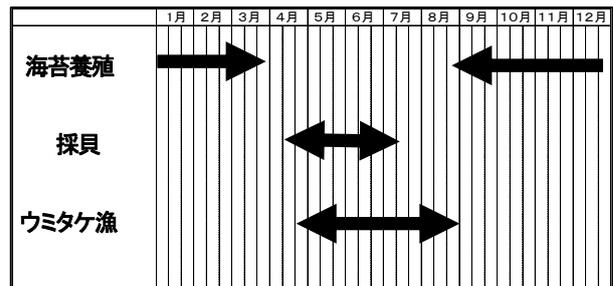


図2 漁業専業タイプの漁業暦

かかる漁業専門型の海苔漁家について、その生業の変遷をみると、1970年代後半には、副業としての干潟・浅海漁業（タイラギの潜水漁業を含む）は後継者が中心となった（図3参照）。

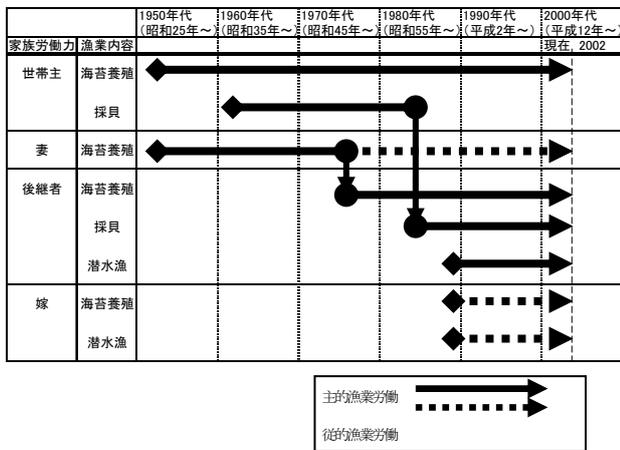


図3 漁業専門型の生業構造の変遷

（聞き取り調査により作成、遠藤（2005）を一部改変）

農業、もしくは臨時的雇用を含む複合的な生業を営む海苔養殖漁家についてみると、養殖の漁閑期に副業的な採貝を行う程度で、マイナー・サブシステムとしての干潮時の干潟漁撈と水稲とタマネギ栽培が組み合わされている（図4参照）。いずれも海苔の漁期と重なるが、水稲の機械化・機械利用組合、タマネギの委託栽培によって複合的な経営が成り立っている。

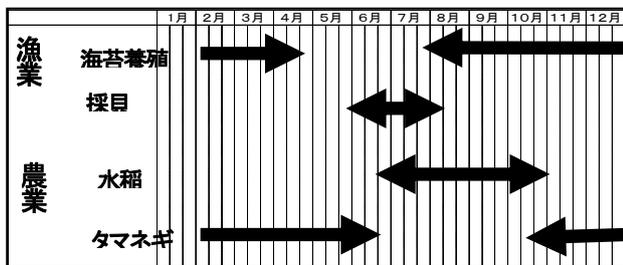


図4 複合的生業型の生業暦

（聞き取り調査により作成、遠藤（2005）を一部改変）

3 鹿島市における海苔養殖業の協業化と生業複合

(1) 海苔養殖の協業化と漁業集落

鹿島市における海苔の養殖は昭和30年頃から本格的に生産が始まったが、平成12年からはノリ養殖の協業化を推進し、個人経営者を集めて協業体を組織し、経営の安定化を図っている。協業化は、労力の軽減や設備投資のコストダウンがはかれるが、投資額と収益の関係、協業体内の人間関係など様々な課題を抱えている。ノリ養殖を始める前は干潟での伝統的な漁撈を半

農半漁で行っていた。農業の基幹産業であるミカン栽培は、昭和39（1964）年、わが国最初の国営パイロット事業として多良岳東麓がミカン園として造成されオレンジベルトと称された。しかし、昭和50年代以降の価格下落により廃園・転作が進展した。この時期には海苔養殖が本格化し、海苔の収穫時期とみかんの収穫時期が重なるため、ノリ専業もしくは稲作との複合へと変化した。1979年の個人漁業経営体数は455であったが、平成8年には300、平成15年には218へと減少した。主な漁獲物はグチ・モガイ・カキ・ムツゴロウで、平成10年の水揚げ量約2,100tのうち、モガイが1,800tと水揚げ量の中心を担っている。

有明海のノリ養殖区域は、東部・中部・西部・南部に大別されるが、西部の鹿島市は小規模経営体が多かったこともあり、協業化率が最も高い。区画漁業権の第一種区画漁業にあたる海苔養殖は、漁協への出資金によって漁業権を得るが、鹿島ではカキやモガイの養殖を盛んに行ってきたため、ノリ養殖が盛んになるに伴い先代の養殖場をノリ養殖に転換することで、漁業権を獲得・拡大してきた。

ノリ漁家数は、総経営体数が218のうち153と大半を占め、昭和40（1965）年に400を超えていたが、平成12年の協業化への取り組みによる経営体の減少も含め、平成15年には153までに減少し、その大半は高齢者である。漁業集落は、鹿島（三部・新籠・森、浜（北舟津・南舟津）、七浦（母ヶ浦・西塩屋・東塩屋・大宮田尾・小宮道・音成・飯田）からなり、漁業経営体数は、漁村地域である浜地区が最も多く、鹿島は稲作との複合、七浦は比較的小規模経営体が多く、水稲やみかんなどを栽培しているが、漁業を主とする兼業漁家が多い。大半が漁業権による漁を行っているが、七浦地区では干潟での漁撈を少なからず継承している（図5参照）。

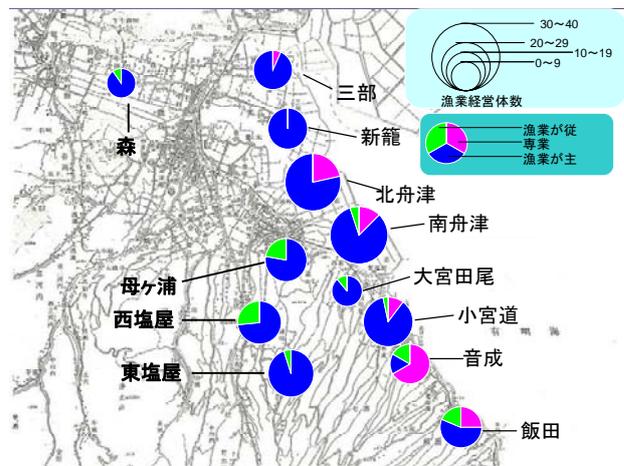


図5 鹿島の漁業集落と専兼別漁業経営体数(2005年)

（漁業集落カードにより作成、森永（2007）を一部改変）

干拓地の広がる北部の鹿島地区では海苔と水稻の半農半漁形態が卓越し舟津の漁村地区では海苔と採貝を中心とする浅海漁業、南部七浦地区では海苔・浅海漁業を中心としながらも、ミカン・園芸・干潟漁撈も含む複合的な生業形態が多い（図6参照）

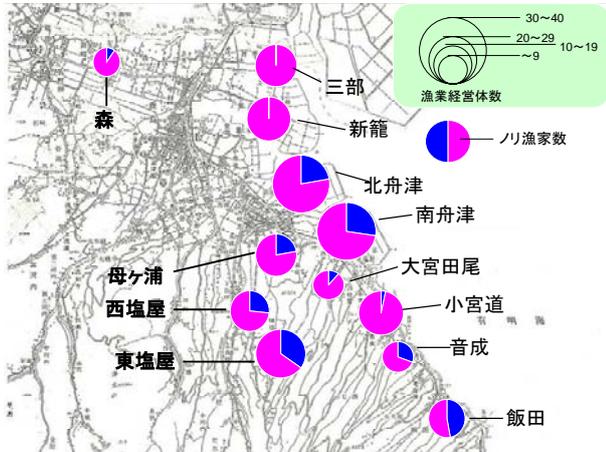


図6 鹿島の漁業集落別海苔漁家数の割合（2005年）
（漁業集落カードにより作成、森永（2007）を一部改変）

（2）ノリ養殖の協業化と協業体の特性

鹿島市には、現在12協業体が存在し、1経営体ごとに貯蔵・洗浄・切断・乾燥・束ねるなどの作業を自動で行う大型機械を設置し、5~6人体制で運営している。協業化は、海岸部に加工所を設けることで集落内の機械の騒音や排水といった環境面の改善や、収穫後の加工作業を一人8時間のローテーションによる24時間体制を確立したが、投資額全体のうち国40%・県15%・市その他から10%の補助金を得て設備投資を行い、コストダウンを図っている。



図7 海苔網区画の位置と漁港・加工施設の分布
（森永（2007）を一部改変）

協業体のうち、複合的な生業形態が残存する七浦地区のA水産を事例に、協業体の特性について考察した。

	年齢	漁業種 獲得の経緯	協業前の ノリ網数	家族労働	生業構造
A氏	58	カキ養殖 →ノリ	220枚	夫婦	ノリ養殖・水稻など (田:0.3ha 畑:1.5ha)
B氏	54	モガイ養殖 →ノリ	220枚	夫婦	モガイ・水稻・ミカン (田:0.6a 畑:1.2ha)
C氏	50	カキ養殖 →ノリ	250枚	夫婦・息子	モガイ・ノリ養殖
D氏	48	カキ養殖 →ノリ	220枚	夫婦	モガイ・ノリ養殖
E氏	34	モガイ養殖 →ノリ	280枚	夫婦	モガイ・ノリ養殖

表1 七浦地区A水産（協業体）の構成と生業構造
（聞き取りにより作成、森永（2007）を一部改変）

A水産は他の協業体が複数の集落出身で構成されるのに対して、5人の構成員はA集落の住民による協業体である。平均年齢は48歳で比較的若い構成員からなり、先代のモガイやカキ養殖の権利を転換するか、2重免許という形で漁業権を獲得した。海苔網は220~280枚から240枚に統一することで、家族内での労力や収益の均一化をはかり、種付けや収穫は夫婦で、加工では夫が機械操作、妻がノリの検品などの役割が分担されている。協業化全と比べて、協業化による分業化・ローテーション・システムによって、個々の構成員の労働時間は格段に減少し、休養と副業としての農業・兼業時間が確保されるに至った（図8参照）。

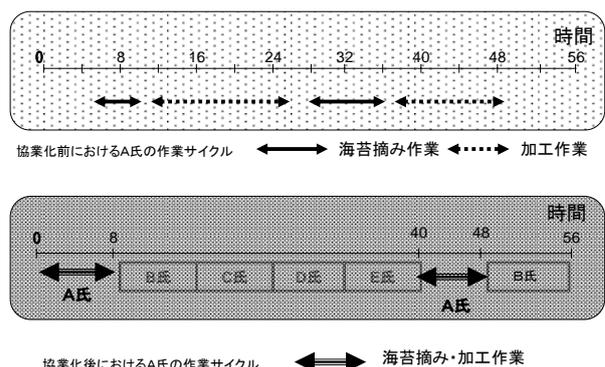


図8 A水産における協業化前後の作業サイクルの変化
（聞き取り調査による、森永（2007）を一部改変）

生業構造では水稻や柑橘類を副業としているか、先代からのモガイ養殖を継承するなど、七浦地区の伝統

的な生業構造を継承しながら、海苔養殖業への転換が進んでいる。モガイは収量の年変動が大きく不安定であるため、海苔の漁閑期の副業的性格が強い。海苔の生産量は、平成13年には600万枚、17年度には約800万枚と約500万枚の平均値より大きく抜き出ており、生産金額も増加している。

協業化は、労働力やコストの削減、環境への配慮、後継者の確保による高齢化問題への対策や労力の均一化、安定した生産や収入等において大きな役割を果たしたと考えられる。特に、女性における労働力の軽減や、後継者の確保は海苔養殖の持続的な要素であると考えられる。また、協業化の負の側面として挙げられる人間関係の課題は、A水産では同じ集落住民によって構成され、信頼・協調といった点で安定した経営がなされている。A水産における協業化は、海苔養殖の改善や存続だけではなく、半農半漁や伝統漁撈といった地域特有の伝統を継承しながら、経営の安定化と持続的な生産を継続させる特性を有しているのではないかと考えられる。

4 おわりに

本研究では、白石平野と鹿島における海苔漁家の複合的な生業構造の変遷に焦点を当て、干潟・沿岸域エコトーンにおける複合的生業の持続可能性を考察するためのアプローチを試みた。農業集落カードや漁業集落カードを活用したミクロな集落構造の分析と、個々の漁家のライフヒストリーをより丁寧に分析することで、たとえば海苔の不作という「異変」や社会的経済的状況の変化に対して、海苔以外の生業との組み合わせによるいかなる対応を試みてきたのか、意思決定要因としての生業の多様性が持つ意味について明らかになるであろう。これらについては、今後の課題とした。

【付記】本稿は、遠藤茂樹君による平成14年度の大学院農学研究科修士論文、及び森永久祥君の平成18年度農学部卒業論文の作成にあたり、福富町と鹿島市において筆者が共同で調査を行ったデータを再構成し、筆者の白石平野における干拓と干拓地の灌漑システムに関する前稿を発展させたものである。遠藤・森永の両君に紙上を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 秋道智彌：『コモンズの人類学—文化・歴史・生態』人文書院、2004
- 2) 安室 知：「水田漁撈と現代社会—環境思想とフォークロリズムの交錯」、国立歴史民俗博物館研究報告、123、2005
- 3) 有明干拓史編集委員会編：『有明干拓史』、九州農政局有明

干拓事務所、1969

- 4) 五十嵐勉：「海面干拓における単式干拓から複式干拓への展開過程と干潟の環境」、吉越昭久編、『人間活動と環境変化』、古今書院所収、83-104、2001
- 5) 五十嵐勉：「白石平野の開発過程と複合的生業—地先干拓の持続的性格—」、日下雅義編、『地形環境と歴史景観—自然と人間の地理学』、古今書院所収、180-191、2004、
- 6) 五十嵐勉：「海面干拓の展開過程と複合的生業の持続可能性」、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、1、169-172、2005
- 7) 五十嵐勉：「蕨野の集落と棚田・文化的景観の保存と活用」、文化庁委託事業『文化的景観「蕨野の棚田」保存活用事業報告書』、佐賀県唐津市所収、2005
- 8) 五十嵐勉：「有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける複合的文化景観の保全（1）—出水平野のツル越冬地における冬季湛水田と湿地のワイズ・ユース—」、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、2、2006
- 9) 五十嵐勉：「白石平野における灌漑システムの変容と水資源管理」、低平地研究、15、16-23、2006
- 10) 遠藤茂樹：「有明海沿岸における複合的生業の持続的性格—佐賀県福富町の海苔漁家を中心に」、平成14年度佐賀大学大学院農学研究科修士論文（3号館フィールド年報、5、134-138）、2005
- 11) 小林恒夫：「有明海漁業におけるノリ（海苔）モノカルチャーの形成」、佐賀大学農学部彙報、88、2003
- 12) 佐野静代：「エコトーンとしての潟湖における伝統的生業活動と「コモンズ」—近世～近代の八郎潟の生態系と生物資源の利用をめぐる—」、国立歴史民俗博物館研究報告、123、2005
- 13) ジュールス・ブレティ（吉田太郎訳）：百姓仕事で世界は変わる—持続可能な農業とコモンズ再生、築地書簡、2006
- 14) 菅 豊：「歴史」をつくる人びと—異質性社会における正当性の構築」、宮内泰介編、『コモンズをささえる仕組み—レジティマシーの環境社会学』、55-81、2006
- 15) 武田淳・五十嵐勉・趙慶萬・李應吉吉：「干潟の水族資源（第1報）—有明海における伝統的採捕技術と多様性」、佐賀大学農学部彙報83、79-98、1998
- 16) 中村周作：「有明海漁村における浅海水域利用の変容—佐賀県川副町のノリ養殖業を事例として」、低平地研究、5、75-86、1996
- 17) 文化庁文化財部記念物課（監修）：『日本の文化的景観—農林水産業に関連する文化的景観の保護に関する調査研究報告書』、同成社、2005
- 18) 森永久祥：「ノリ養殖の協業化と協業体の特性—鹿島市O水産を事例に」、平成18年度佐賀大学農学部卒業論文、2007
- 19) 山下宗利：有明海沿岸域における漁業集落の構造、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、第2巻、2006

有明海、及びアジア諸地域における干潟のワイズ・ユースに関する比較研究、 及び干潟の生業・生活文化のデジタルアーカイブの構築—第2報—

Comparative Study on the Wise Use of Tidal Flat in the Ariake Sea and Asian Coastal Regions, And the Constructions of Subsistence and Human Life-Digital Archives

五十嵐 勉¹・武田 淳²・辻 一成³・藤村 美穂⁴

Tsutomu IGARASHI, Jun TAKEDA, Kazunari TSUJI, and Miho FUJIMURA

¹文修 佐賀大学助教授 農学部生物環境科学科・地域資源学研究室(人文地理学)(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²理博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科・地域資源学研究室(生態人類学)(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³農博 佐賀大学助教授 農学部生物環境科学科・地域ビジネス開発学研究室(農業経営学)(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

⁴社修 佐賀大学講師 農学部生物環境科学科・人類生態学研究室(環境社会学)(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Key Words: *Seashore ecotone, Cultural landscapes, temporary wetland, winter-paddy field, sustainability, wise use, Digital Archive, Ariake Sea, Kokai Sea*

1. 干潟のワイズ・ユースに関する画像データベースの構築と干潟生業・生活文化デジタル・アーカイブの意義

水辺エコトーン(生態学的移行帯)としての干潟域は、生物多様性の場としての生態学的機能が強く再評価されている。同時に、この干潟域は生物資源の豊富な場所でもあり、干潟漁撈や湿地植物の採集、あるいは水鳥の狩猟など、多様な生業活動・資源利用の場として、世界各地でつい最近まで、持続的に利用されてきた。そのような資源利用の場の多くは、コモンズと呼ばれる共有地(共有資源)であり、共同体的な規制や文化的慣習・制度などに基づく持続的な資源利用システム—ワイズ・ユース(賢明な利用)—が存在していた。

このような水辺エコトーンにおけるワイズ・ユースは、有明海に限らない普遍性と地域独特の固有性も有している。しかしながら、このようなワイズ・ユースは、近代化やグローバル化の進展とともに世界中から消失しているばかりでなく、干潟そのものが干拓や埋め立てによって急減し、汚染物質の流入をはじめとした陸域の環境変化によって、干潟の水産資源の減少をももたらした。

我々の研究グループは、本研究プロジェクトのみならず、個々の研究におけるフィールドワークにおいても、可能な限り干潟や湿地の水辺エコトーンにおける

資源利用や生業システムの調査研究を随時、実施している。これは、干潟の生態的条件や干潟利用の歴史、あるいは資源利用をめぐる文化的・社会的・経済的条件の違いによって、その社会問題としての現れ方、そしてそれに対する対応も、国や地域・民族によって異なっており、そういう干潟全体のなかで有明海問題を再考することが重要であると考えからである。敢えて、有明海の外から有明海を逆照射する視点も総合研究ならではの可能性の選択である。

我々は、これまでのところ、有明海北岸と西岸(鹿島・太良・諫早)、八代海、及び有明海に近似する干潟生業・生活文化が蓄積されてきた韓国西岸と中国黄河デルタを含む環黄海域での予備的なフィールドワークで蓄積したワイズ・ユースに関連するデータを、デジタル・アーカイブとして構築し、Webサイトで発信する準備を進めている。さらには、このような水辺エコトーンの破壊や過剰利用への危惧から、オルタナティブな開発として実践されはじめた環境教育を含むエコツーリズムやエコミュージアムなどの世界各地で実践されている「新しいワイズ・ユース」についても、積極的に情報を収集し、データベース化を試みている。

2. 干潟の生業・生活文化デジタル・アーカイブの構築と発信

画像番号	画像撮影日	画像--	撮影地域	撮影者-データ提供者	画像解説キーワード	画像データ	関連資料
yatsushiro-051107-01	2005.11.07	jpeg	八代海、出水市	五十嵐	渡り鳥 干拓地 冬季湛水田 ツル		
yatsushiro-051107-02	2005.11.07	jpeg	八代海、出水市	五十嵐	干拓地 裏作 ツル 自然採餌		
yatsushiro-051107-03	2005.11.07	jpeg	八代海、出水市	五十嵐	干拓地 裏作 ツル 自然採餌		
thailand-050925-001	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 塩田 干拓地		
thailand-050925-002	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 干拓地 塩田		
thailand-050925-003	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 干拓地 調整池 エビ養殖場		
thailand-050925-004	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 滞筋 漁撈		
thailand-050925-005	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 エビ養殖場 開放系		
thailand-050925-006	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 エビ養殖場 閉鎖系		
thailand-050925-007	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 マングローブ木炭		
thailand-050925-008	2005.09.25	jpeg	タイ シヤム湾 アンパワ郡	五十嵐	マングローブ干潟 エコツーリズム 漁家民宿 エコツアーガイド		

図1 デジタル・アーカイブ構築のためのデータベース

(FileMaker Pro による)

デジタルアーカイブの構築には、アーカイブ理論に基づいたキーワード検索、階層検索、絞り込み検索等ができ、目録の詳細情報の他、デジタル画像も閲覧が可能なシステムが必要である。また、利用者の利便性を高めるため、あるいは内外の多様なデータベースとの連携のため、横断検索機能も実装し、情報知識の幅広い共有と提供を実現する必要がある。

我々は、検索キーワードの充実に心掛け、現在まで干潟沿岸域エコトーンにおける漁撈をベースにしたデータベースを構築している。伝統的な漁撈別に、漁撈風景、漁具、漁民、水族資源とその利用、漁撈習俗に関わる行事・信仰、及び漁撈とかわりの深い農耕文化などが基本的データである。関連するデータとして、日記・漁業史・農業史に関連する歴史的ドキュメント、漁場・漁村の大縮尺地図・航空写真なども可能な限り収集し、デジタル化を試みている。

現在まで収集したデータは、有明海と韓国西海岸(黄海)を中心に、アジア全域に及ぶ。このうち、有明海における伝統的な漁撈別のデータをデータベース化し、随時、デジタル・アーカイブとして整備している(図)。

有明海における伝統的な漁撈は以下のとおりである。

①すくい、②あんこう網、③しげ網、④定置網(竹羽瀬、ガタ羽瀬、アバ羽瀬)、⑤ゲンシキ網、⑥ワラスボ漁(スポ掻き、板鋏、素捕り、待ち網)、⑦イミタケ

漁(ウミタケねじり、手づかみ、簡易潜水器)、⑧ムツゴロウ漁(竹筒、タカッポ、ムツかけ、掘りムツ漁、すくい網、ムツ巻き網、さしムツ漁、つきムツ漁)、⑨こうもり漁、⑩アゲマキ漁(手どり、アゲマキ掘り、釣り)、⑪長柄じょれん船びき、⑫投網、⑬棚四つ手網(タナジブ)、⑭ウナギ漁(ウナギ塚、ウナギかけ、ウナギ筒、ウナギうけ、ウナギつかみ、ウナギ網、ウナギさし)、⑮クチゾコ漁、⑯流し刺し網(エツ流し刺し網、コノシロ流し刺し網)、⑰サヨリすくい、⑱タイラギ漁、⑲クラゲ漁(クラゲ網、クラゲすくい)、⑳ミドリシャミセンガイ(メカジャ)漁(メカジャとり、板鋏)がんずめ、21 シオマネキ漁(手掘り、カニ釣り)、22 アナジャコ漁(アナジャコ釣り、アナジャコ掘り)、23 うぎ(シャボ)、24 タコ漁(キャッポ)、25 イカ籠漁、26 タイ一本釣り、27 帆打瀬網漁、28 イソギンチャク漁、29 カキ(カキ床、かち採り)、30 ノリ養殖。

これらのなかには、現在ではほとんど見られない漁撈も含まれているが、我々は現存するものについての撮影データと、過去のアナログ・写真をデジタルに変換して、アーカイブとして活用する。

これらデータ属性は、事項(事象名)、場所、データ所有者名、撮影者、開設データ等を入力し、デジタル画像はサムネイル形式で整備している(図2～

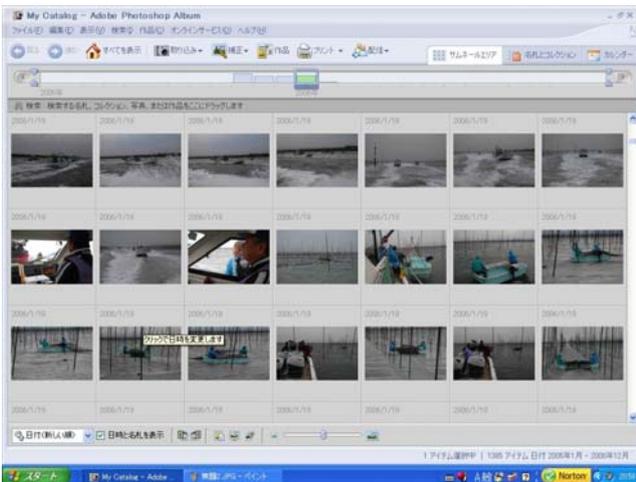
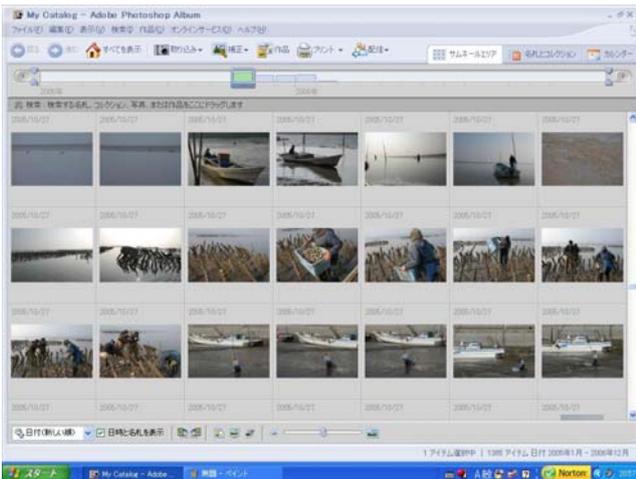


図2 有明海における干潟の生業・生活文化画像データベース(サンプル) 写真家・中尾勤悟氏撮影データ

図4 干潟の生業・生活文化デジタル・アーカイブス (画像・地図、サンプル)



図3 タイ(シャム湾)における干潟の生業・生活文化画像データベース(サンプル)

図4 写真家、中尾勤悟氏の作品アーカイブ(サンプル)

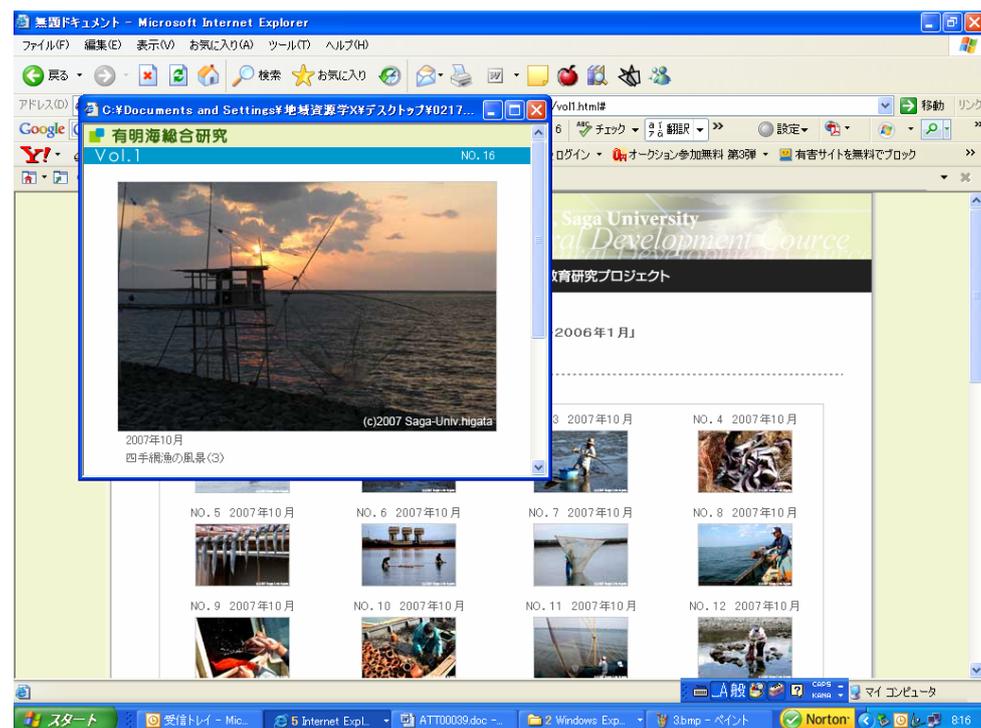


図5 Web サイトによる干潟生業・生活文化デジタル・アーカイブ

(上段は鹿島の干潟におけるスゴ搔き漁、下段は鹿島のタナジブ漁)

これらのデジタル・アーカイブは、web サイトでの公開を前提として構築している。データのほとんどはオリジナル・データであるため、ダウンロードは原則として禁じている。漁法、水族資源などの解説データを付しており、サイト上でのキーワード検索が可能なシステムとなっている。

web サイトは、有明海、韓国の順に公開予定であるが、数百点に及ぶデータの精選とサーバー容量の問題から、2007年度中に公開される。このデジタル・アーカイブは、失われた(失われつつある)干潟域での生業・生活文化の記録保存に留まらず、研究資料として活用されることを期待している。

有明海沿岸地域における干拓集落の景観

RURAL LANDSCAPES OF RECLAIMED LANDS ON THE ARIAKE SEA, SAGA, JAPAN

藤永 豪
Go FUJINAGA

博士(理学) 佐賀大学講師 文化教育学部 地域・生活文化講座 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Landscapes are traces of human activity inscribed on the earth, and are shaped even today by activities of individuals and societies, and therefore continue to change. Landscapes deal with all aspects of people's lives, culture and climate, including the people themselves, tools, houses, communities, farmland, vegetation, topography and villagers' behavior including gesture. So landscapes give us a glimpse of aspect of region.

The purpose of this study is to clarify the characteristics of the coastal region on the Ariake Sea through the analysis of rural landscapes in reclaimed lands.

Key Words : Rural Landscape, Reclaimed Land, Saga, Ariake Sea

1. はじめに

「景観」とは単なる目の前に広がる「風景」ではない。「景観」とは地表に刻み込まれた人間活動の痕跡であり、現在も個人あるいは社会全体の動きを反映しながら形作られ、変化し続けている(藤永 2004)。例えば、水田一つとっても、それは過去のいずれかの時代にある人物あるいは集団によって拓かれたものであり、その背後にはその時代の社会経済環境や政治制度などが作用として隠れている。現在の大型機械が利用可能な広い面積を持った水田も圃場整備事業という戦後の農業政策の転換や効率化・高収量を願う農民たちの願いが創り上げたものである。したがって、「景観」の中に現れる事象は、ひとや動物、道具、家屋、集落、耕地、植生、地形に加え、はてはむらびとの行為、しぐさといった生活・文化・風土全般に関わるさまざまな要素を含んでいる。

また、筆者の専攻する地理学では、「景観」とはドイツ語のランドシャフト *Landschaft* の訳語であった。この「*Landschaft*」にはもともと場所という意味があり、英語の「*Landscape*」にも領主が所有する領域という意味が込められていた。すなわち、「景観」を探るということは、ある場所や空間における人々の生活や感情までもを探ることにつながる。

本報告では、いくつかの干拓集落を対象にその景観と構成要素をみていくことで、有明海沿岸地域の特徴の一端を明らかにしたいと考える。

2. 有明海沿岸地域における干拓事業

周知のように、有明海沿岸では、中世の頃より干拓が行われてきた。同地域には、この干拓に由来する独特の地名が残されている。中でも「搦」は有明海沿岸で見られる特徴的な地名の一つである。特に江戸期から明治期にかけての干拓集落名に多い。この他、佐賀県内では西部の鹿島市を中心に籠(こもり)、福岡・熊本県では開(ひらき)・新開(しんびらき)、長崎県では籠・開といった地名がみられる。搦という地名の由来は堤防築造の工法に起因するといわれ、今日でも河川や溝渠の簡単な護岸工事では、くいを打ち、竹や粗朶を絡めつけて土砂の崩壊を防ぐ工事を「岸がらみ」と呼んでいる(青野・尾留川編 1976:66)。佐賀藩は殖産興業の一環として積極的に干拓造成を行った。農民たちは干拓組合を組織し、組合長を舩頭(もやいがしら・ふうつう)、組合員を搦子(からみこ)と呼び、明治期以降もこれらの呼称は引き継がれた(「角川日本地名大辞典」編纂委員会 1982:34)。

これに対して、第二次世界大戦後は、国や県による干拓事業が実施された。引揚者や食糧増産を目的とし、緊急開拓法の成立もあって、大規模な干拓事業が各地で押し進められた。

本報告では、このような時代背景の異なる複数の集落を紹介していく。

3. 干拓集落の景観

本報告では、対象とする景観構成要素は、干拓集落という特性も考慮して、便宜的に、①集落の形態、②家屋、③耕作地、④水路、⑤道路、⑥その他の地物や建造物とする。

(1) 江戸期から明治期に成立した干拓集落

ここで紹介するのは、佐賀県佐賀郡久保田町に立地する搦である。久保田町もその三分の二が干拓によって造成された（佐賀新聞社佐賀県大百科事典編集委員会編 1982：129）。対象集落はこの久保田町南部に位置し、搦東と搦西に分かれている。

①**集落形態** 搦の集落は塊村の形態を呈している（写真1）。これは集落成立における歴史的要因が作用している。搦は江戸期から明治期にかけての干拓造成によってできた集落である。佐賀藩の干拓事業は天明以降、1780年頃より盛んとなったが、その特色は零細農民による小規模な干拓にある。佐賀藩は1783（天明3）年に、藩財政強化のために六府方（ろっぶかた）を設置し、その一部局として干拓事業を担当する搦方（からみかた）を置いた（青野・尾留川編 1976：63-65）。しかしながら、佐賀藩の財政事情は悪く、搦方は干拓の指導援助を目的としながらも、大規模な支援を行うことはできなかった。しかも、商人資本の参入を原則禁止としたために、小規模な「搦」が林立することとなった。搦の小塊村としての景観には、このような歴史的背景が隠れている。



写真1 久保田町搦集落

②**家屋** 搦の場合、入母屋造りの母屋をはじめ、瓦葺の納屋や広い敷地をとり囲む塀など、いかにも重厚で伝統的な雰囲気醸し出している（写真2）。中には佐賀平野でみられるクド造りの家屋も存在する。後述するが、このような家屋景観は第二次世界大戦後の干拓集落ではほとんどみられない。



写真2 搦集落の家屋景観

③**耕作地** 耕作地の景観においては、搦集落のそれは他の集落と大きな差異はみられない（写真3）。もともとは一筆毎の面積が狭い耕作地であったが、1970年から1975年にかけての圃場整備によって、現在のような広区画となった。冒頭でも述べたように、この景観には、圃場整備事業という戦後の農業政策の方針や効率化・高収量を願う農民たちの願いが隠されている。



写真3 搦の耕作地

④**水路** 近年まで、佐賀平野はクリーク網が発達し、その脇には柳等の樹木が植えられ、独特の景観をなしていた。しかし、圃場整備によって、暗渠排水が埋設され、クリークと樹木は姿を消した。搦でも同様に用水路は改変され、数本の基幹水路とその支線が直線状に走っている（写真4）。両岸はコンクリートで固められ、かつての景観を偲ばせるものはほとんど残されていない。また、クリークは集落内にも引かれ、民家の敷地の裏には水辺に出るための階段が設置されていた。住民はここで洗物などを行った。搦ではその名残りが今でもみられ、当時の住民と水との緊密な関係が読みとれる（写真5）。

⑤**道路** 集落外の道路、すなわち、農道については、圃場整備もあって、直線的であり、景観上、他の集落と大

きな差異はみられない。しかし、集落内の道路は塊村という形態から特徴を示す。細く狭い道路が不規則に交差しながら、集落内の各世帯を結んでいる(写真6)。すなわち、捌の場合、集落内における網目状の道路の周りに、耕作地を巡る格子状の直線道路が広がっている。



写真4 捌の農業用水路



写真5 捌集落内を流れるクリーク



写真6 捌集落内の道路

⑥**その他の地物や建造物** 捌においてみられるその他の地物として、小祠や石像がある(写真7)。当然のことであるが、実は第二次世界大戦後に造成された集落ではこのような信仰に関わる地物が少なく、まったく見られない場合もある。続いて、写真8は捌集落南端にある堤防であり、明治期までの干拓地と第二次世界大戦後の干拓地の境界である。表面は雑草に覆われているが、堤防は石垣で出来ている。当時の土木技術を示す景観といえる。ただし、現在ではその後の台風による災害を機に、現在ではコンクリートによって補強されている。



写真7 捌集落内に祀られている小祠



写真8 捌の干拓堤防

(2) 第二次世界大戦後に成立した干拓集落

事例として、捌集落の南に位置する江戸集落と白石町新拓集落の景観を紹介する。両集落とも第二次世界大戦後に、国や県の政策の下、開発された大規模な干拓地である。

①**集落形態** 塊村である捌とは異なる路村の形態を呈している(写真9)。これも集落の成立過程と関係している。江戸の場合、開拓地の指定を受け、県内外の引揚者を受け入れているが、同時に開発の最も大きな目的の一つが食糧増産であった。戦後の食糧難の時代である。当



写真9 白石町新拓集落



写真11 新拓の耕作地

然、効率的な農業生産を行うための農村計画が立てられ、写真にも表れているような戦前までとは異なる集落形態をとることになった。

②家屋 江戸と新拓の家屋景観は搦に比べ、シンプルである（写真10）。切り妻もしくは寄棟造りの家屋が中心で、トタンやスレート屋根を冠した納屋が母屋の脇に配置されている。平屋も多く、同じような形態の家屋が道路に沿って並んでおり、いかにも開拓集落的な景観を呈している。このような景観は、戦後造成された他の干拓集落でもよくみられる。



写真10 新拓集落の家屋景観

③耕作地 戦後開発された両集落とも当然ながら、耕作地が広く、当初から整然とした土地区画となっている（写真11）。一見ただけでは、搦と同じような景観に見えるが、その成立過程は異なる。ただし、戦後の農業政策の下で、成立過程が違う集落の耕作地は同じ目的のもと同じような景観へと変貌したといえる。

④水路 江戸と新拓の水路は、搦に比べて規模が大きい（写真12）。コンクリート製であることはもちろん、幅も広く、大型の水門が設置されている。搦の水路のように民家と隣接することなく、完全に農業用水路としての



写真12 久保田町江戸の農業用水路と水門

みの機能を有している。この水門は、まさに近代農業土木技術を象徴する景観といえよう。

⑤道路 両集落の道路は写真9をみてもわかるように、集落内を一本のメインストリートが貫通し、そこに複数の農道が直交する規則的な形状となっている。戦後の開拓集落の特徴を見事に現す景観である。

⑥その他の地物や建造物 搦とは違い、江戸と新拓の両集落には信仰にかかわる地物がほとんどみられない。戦後に急遽造られた集落の特徴である。搦と江戸および新拓の景観には第二次世界大戦以前と以後という時代の影響が色濃く出ている。

最後に示したのが江戸の最南端の干拓堤防である（写真13）。その先は有明海が広がる。戦前の堤防とは、明らかに規模やその技術力において差がみられる。国家主導の下実施された大規模干拓事業の様相を如実に表現する景観である。



写真13 江戸南端の干拓堤防

4. 集落景観の比較をとおして

ここまで、搦と江戸および新拓の各集落の景観を構成要素毎にその特徴を述べてきた。この景観構成要素を比較することで、どのようなことがみえてくるだろうか。

一つは集落の成立時期の違いが景観に反映されていることである。搦は明治期までに成立した集落であり、小塊村の景観を示す。瓦葺の入母屋造りの家屋が多く、集落内を流れる水路はかつての住民と水との密接な関係を示すなど、伝統的な農村景観を呈している。一方、江戸と新拓は第二次世界大戦後に成立し、道路は直線的で、整然とした列村の景観をみせる。

また、いずれの集落も干拓によって造成された歴史的経緯を持つ。したがって、その景観には干拓造成を行った開発主体の影響が表れている。佐賀平野の干拓は佐賀藩の援助、指導の下に行われたが、藩財政の都合から組合による小規模な事業が多かった。明治期に入っても干拓造成の規模は小さなままで、搦集落の景観はその小規模干拓の様相を示している。一方、江戸と新拓集落は第二次世界大戦後に本格的に造成が進んだ。政府の開発計画にもとづき、生産性、効率性に重きを置いた大規模な開発がなされた。そのため、日本各地の開拓地と類似したシンプルな集落と家屋景観が作り出され、耕作地は区画が大きく、格子状の規則的な直線道路が敷設された。その上、小祠や石像など信仰に関する地物はみられない。

ただし、搦集落も、戦後、圃場整備がなされ、耕地区画は拡大し、道路も直線的なものへと改変された。もちろん、この開発は農林水産省を中心とする戦後の新政府によって実施されたものである。

したがって、搦集落は明治期までの佐賀藩の流れを汲んだ干拓政策と戦後における新政府の農業政策の両者によって作られた景観といえる。そして、いうまでもなく江戸と新拓の両集落は、新政府によって作られた景観である。

この他、それぞれの集落の景観から、戦後の日本農政における特徴がみえてくる。特に耕作地の景観に、そのことはよく表れている。広区画の耕作地、直線的な道路、これらはすべて大型機械導入などの作業効率・生産性向上のための結果であり、各集落とも似たような耕作地の景観を示すようになった。すなわち、政府主導の強力な農業政策は成立の時期やその歴史的背景の異なる農村を、意図的ではないにしても、似たような均質的な空間、景観へと変えてしまったのである。その強力な国家権力の象徴的景観ともいべきものが、近代的な用水路や大型水門である。

もちろん、このような農業政策を実行していくためには、それを支える技術力が必要である。石垣の堤防とコンクリートによって造成されたスーパー堤防の景観を比較すれば、戦後の農業政策を支えた土木技術の発展がよく理解できる。

5. おわりに

以上、佐賀県有明海沿岸におけるいくつかの干拓集落の景観を比較考察した。その結果、景観から集落の成立に関する歴史的背景や政策にみられる国家や権力、経済状況、技術力などが浮かび上がってきた。ただし、ここで忘れてはならないのは、人々の営みと思いがこれらの景観を形作っているということである。食糧や仕事、定住のための場所の確保といった、その時代時代における人々の希求や欲求が景観の裏側には隠されており、それらが強く作用している。いえることは、景観とはわれわれ人類の営みが創り上げた大きな一つの姿、形であり、地域に暮らす人々の意思ということである。干拓という特徴は、有明海という地域の特徴を景観をとおして如実にわれわれに示しているのである。

ちなみに、写真14は搦集落に隣接する新興住宅地である。アパートなどの集合住宅もみえる。これも現在の有



写真14 搦集落に隣接する新興住宅地

明海沿岸地域の景観の一つの姿である。第二次世界大戦前と後の集落、さらには「干拓という時代」を過ぎた「新しい街」の出現……。景観は常に時代の波を受けながら、人々の意識の下で変化し続けており、この点において、有明海沿岸地域という空間の特色を現してくれる格好の材料なのである。

参考文献

青野壽郎・尾留川正平編（1976）：『日本地誌 第20巻 佐賀県・長崎県・熊本県』二宮書店。

「角川日本地名大辞典」編纂委員会（1982）：『角川地名辞典41佐賀県』角川書店。

佐賀新聞社佐賀県大百科事典編集委員会編（1983）：『佐賀県大百科事典』佐賀新聞社。

藤永 豪（2004）：中山間地域における住民の環境利用と生活空間の変化—写真にみる景観の変遷をとおして—。神奈川大学21世紀COEプログラム 年報 人類文化研究のための非文字資料の体系化, 2, 171-186.

(2007. 3. 19受付)

【連絡先】

佐賀大学有明海総合研究プロジェクト

Ariake Sea Research Project, Saga University

〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地

Phone/Fax : 0952-28-8846

URL : <http://www.ariake.civil.saga-u.ac.jp/index.html>



<http://www.ariake.civil.saga-u.ac.jp/index.html>

